



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**TRIBOLOGICKÉ CHARAKTERISTIKY CHYTRÝCH
KAPALIN**

TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF SMART FLUIDS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michal Michalec

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Bc. Michal Michalec
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Tribologické charakteristiky chytrých kapalin

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Chytré kapaliny lze rozdělit podle charakteru buzení na magnetoreologické (MR) a elektoreologické (ER) kapaliny, přičemž oba typy reagují na aktivní pole. Chytré kapaliny obsahují stabilní suspenzi mikroskopických polarizovatelných částic se schopností měnit reologické vlastnosti v závislosti na aktivním poli. Možnost plynule měnit reologické vlastnosti kapalin působením aktivního pole skýtá velkou výzvu v oblasti chytrých ložisek.

Typ práce: výzkumná

Výstup práce: publikační výsledek (Jsc)

Projekt: Specifický výzkum

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem je stanovit vliv aktivního pole na třecí charakteristiky nekonformního kontaktu mazaného chytrou kapalinou, užitím univerzálního tribometru.

Dílčí cíle diplomové práce:

- analyzovat problém a provést bibliografickou rešerši chytrých kapalin pro tribologii,
- navrhnout experimentální přístup a parametry měření,
- modifikovat stávající experimentální zařízení,
- experimentálně stanovit a analyzovat vliv aktivního pole na tření.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkresy součástí, digitální data.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2019.pdf

Seznam doporučené literatury:

LUO, J. B., M. W. SHEN a S. Z. WEN. Tribological properties of nanoliquid film under an external electric field. Journal of Applied Physics. 2004, 96(11), 6733-6738. DOI: 10.1063/1.1806259. ISSN 0021-8979.

XIE, G., J. LUO, S. LIU, D. GUO a C. ZHANG. Thin liquid film lubrication under external electrical fields: Roles of liquid intermolecular interactions. Journal of Applied Physics. 2011, 109(11), 114302-. DOI: 10.1063/1.3587477. ISSN 0021-8979.

XIE, G., D. GUO a J. LUO. Lubrication under charged conditions. Tribology International. 2015, 84(84), 22-35. DOI: 10.1016/j.triboint.2014.11.018. ISSN 0301679X.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práca sa zaoberá experimentálnym štúdiom tribologických charakteristík smart kvapalín. Smart kvapaliny sú látky v kvapalnom skupenstve reagujúce na prítomnosť magnetického alebo elektrického poľa zmenou reologických vlastností. Pre možnosť aplikácie v zariadeniach využívajúcich konvenčné mazivá je potrebné zvoliť vhodnú smart kvapalinu a študovať vplyv budenia na utváranie mazacej vrstvy, trenie a opotrebenie. Komplexný popis vplyvu budenia je realizovaný použitím troch experimentálnych zariadení a teoretického modelu pre stanovenie parametrov meraní. Hodnotená je hrúbka mazacej vrstvy, priebeh súčiniteľa trenia a opotrebenie počas aktivácie smart kvapaliny v nekonformnom kontakte. Výsledky ukazujú výrazný pozorovateľný vplyv budenia na všetky hodnotené aspekty. Pochopenie mechanizmov budenia smart kvapalín môže byť kľúčovým krokom pri vývoji inteligentných zariadení s aktívnym externým riadením správania a povahy maziva, ktoré by napomohli k zníženiu nákladov na údržbu a k zlepšeniu efektivity.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

MR kvapalina, ER kvapalina, iónová kvapalina, mazanie tenkým filmom, trenie, opotrebenie.

ABSTRACT

The master's thesis deals with experimental study of tribological characteristics of smart fluids. Smart fluids are substances in liquid state reacting to the presence of magnetic or electric field by change in rheological properties. For possible application in devices using conventional lubricants is necessary to choose suitable smart fluid and study the influence of excitation on formation of lubricating layer, friction and wear. Comprehensive description of excitation influence is executed using three experimental devices and theoretical model for measurements parameters specification. Assessed are lubricant film thickness, friction coefficient and wear under smart fluid activation in non-conformal contact. Results show significant observable influence of smart fluids excitation on all assessed aspects. Understanding the mechanisms of smart fluids excitation can be a key step in development of intelligent devices with active external control of lubricant behaviour and character, that could lead to maintenance cost reduction and effectivity improvement.

KEYWORDS

MR fluid, ER fluid, ionic liquid, thin film lubrication, friction, wear.

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

MICHALEC, M. *Tribologické charakteristiky chytrých kapalin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. 111 s. Vedúci diplomovej práce doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.

POĎAKOVANIE

Týmto by som chcel poďakovať vedúcemu práce, doc. Ing. Petrovi Svobodovi, Ph.D., za jeho odborné rady, postrehy a pripomienky. Taktiež by som chcel poďakovať svojim rodičom a blízkym, ktorí ma po celú dobu štúdia podporovali. Moje poďakovanie patrí aj priateľom a najmä priateľke, ktorí spríjemňovali moju cestu životom počas štúdia.

PREHLÁSENIE AUTORA O PÔVODNOSTI PRÁCE

Prehlasujem, že diplomovú prácu som vypracoval samostatne, pod odborným vedením doc. Ing. Petra Svobodu, Ph.D. Súčasne prehlasujem, že všetky zdroje obrazových a textových informácií, z ktorých som čerpal, sú riadne citované v zozname použitých zdrojov.

.....

Bc. Michal Michalec

OBSAH

1	ÚVOD	14
2	PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA	16
2.1	Smart kvapaliny ovplyvňované magnetizmom	17
2.1.1	Tribologické vlastnosti MR kvapalín	20
2.1.2	Vplyv magnetického poľa na tribologické vlastnosti magnetických kvapalín	22
2.1.3	Vplyv magnetického poľa na hrúbku mazacieho filmu	27
2.1.4	Zhrnutie experimentálnych meraní magnetických kvapalín	30
2.2	Smart kvapaliny ovplyvňované elektrinou	31
2.2.1	Tribologické vlastnosti ER kvapalín	33
2.2.2	Vplyv elektrického poľa na tribologické vlastnosti ER kvapalín	34
2.2.3	Vplyv elektrického poľa na hrúbku mazacieho filmu	37
2.2.4	Zhrnutie experimentálnych meraní ER kvapalín	42
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE	43
3.1	Analýza problému	43
3.2	Cieľ práce	45
4	MATERIÁL A METÓDY	46
4.1	Metodika diplomovej práce	46
4.2	Experimentálne kvapaliny	47
4.3	Optické a reologické vlastnosti	48
4.4	Optické pozorovanie budenia	50
4.5	Meranie hrúbky mazacej vrstvy	52
4.5.1	Budiaci obvod	53
4.6	Výpočet predikcie režimu mazania	54
4.6.1	Výpočet viskózne-tlakových súčiniteľov	55
4.6.2	Predikcia mazacieho režimu	57
4.7	Trenie za prítomnosti elektrického poľa	58
4.8	Opotrebenie za prítomnosti elektrického poľa	60
5	VÝSLEDKY	62
5.1	Optické a reologické vlastnosti	62
5.2	Optické pozorovanie budenia	63

5.3	Merania viskózne-tlakových súčiniteľov pre predikciu	64
5.4	Vplyv elektrického poľa na hrúbku mazacej vrstvy	65
5.5	Vplyv elektrického poľa na trenie	66
5.5.1	Stanovenie parametrov meraní	66
5.5.2	Test s budením kontaktnej oblasti	68
5.5.3	Test vplyvu polarít zapojenia	70
5.6	Vplyv elektrického poľa na opotrebenie	72
6	DISKUSIA	75
7	ZÁVER	80
8	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	82
9	ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN	89
10	ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV	92
11	ZOZNAM TABULIEK	95
12	ZOZNAM PRÍLOH	96

1 ÚVOD

V súčasnosti neustále narastajú požiadavky na výkonnosť a účinnosť bežne používaných súčastí strojných zariadení. Z toho dôvodu je nevyhnutné hľadať riešenia, ktorými by bolo možné doceliť požadované nároky. Jedným možným riešením je výskum nových materiálov, ktorých správanie je možné riadiť v reálnom čase. Takéto materiály sú označované ako smart materiály. Z tribologického hľadiska sú významné práve smart kvapaliny, ktorými by bolo možné obohatiť, eventuálne až nahradiť bežne používané mazivá. Za smart kvapaliny sú považované kvapaliny, ktoré menia svoje vlastnosti externým pôsobením magnetického, resp. elektrického poľa. Vhodným spôsobom budenia dochádza k zmene reologických vlastností, a preto pútajú pozornosť kvôli možnosti externého riadenia správania kvapaliny v mechanických systémoch podľa potreby [1].

V posledných rokoch je trendom v oblasti strojárstva a automotive projekt „Industry 4.0“, s ktorým súvisí vývoj inteligentných systémov pre aplikáciu nových technológií. Aktuálnou výzvou v tejto oblasti je vývoj inteligentných ložísk s možnosťou aktívne meniť správanie maziva. V minulosti už vznikli inteligentné ložiská s on-line monitorovaním stavu maziva v spoločnosti Schaeffler (obr. 1-1), ktoré však možnosťou externej regulácie správania maziva nedisponujú. Vzhľadom k tomu, že dosiahnutie zmeny reologických vlastností úpravou teploty je energeticky a časovo náročný proces dosiahnuteľný rádovo v minútach, naskytuje sa možnosť aplikovať smart kvapaliny, u ktorých je možné doceliť zmenu správania maziva okamžite, a preto je potrebné nájsť vhodné smart kvapaliny a venovať sa štúdiu tribologického správania týchto inteligentných mazív, ktoré by v budúcnosti mohli nahradiť bežne používané mazivá súčasnosti.



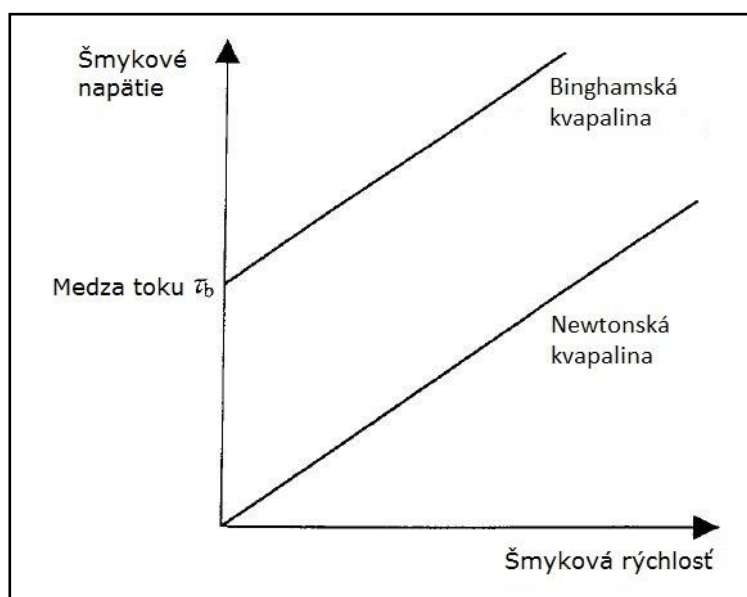
Obr. 1-1 Ložisko od spoločnosti Schaeffler s on-line monitorovaním stavu [www.schaeffler.com]

Tribologické charakteristiky smart kvapalín boli predovšetkým študované bez prítomnosti pôsobiaceho aktívneho poľa. Externé aktívne pole môže výrazne ovplyvniť ich vlastnosti a správanie, a preto je potrebné analyzovať tribologické charakteristiky smart kvapalín aj v aktivovanom stave pre objasnenie tohto fenoménu.

Táto práca sa zaoberá výberom vhodnej smart kvapaliny reagujúcej na prítomnosť externého aktívneho poľa. Vzorka bude volená na základe poznatkov vyplývajúcich z rešeršnej časti. Po zvolení vzorky bude upravená súčasná experimentálna aparatura pre umožnenie budenia zvolenej smart kvapaliny a následne bude skúmaný jej vplyv na hrúbku mazacej vrstvy, trenie a opotrebenie. Motiváciou tejto práce je výskum nových mazív pre vývoj inteligentných ložísk, ktorých reologické vlastnosti by bolo možné meniť skokovo, počas prevádzky.

2 PREHL'AD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

Smart kvapaliny sú kvapaliny, emulzie alebo dvojfázové suspenzie zložené z kvapalnej a tuhej fázy. Kvapalnú fázu tvorí nosná kvapalina, vo väčšine prípadov je to olej s aditívami a tuhá fáza pozostáva z mikroskopických častíc rozptýlených v nosnej kvapaline. Bez vonkajšieho vplyvu aktívneho poľa vykazujú tieto kvapaliny Newtonské správanie. V prítomnosti vhodného aktívneho poľa spôsobujú rozptýlené častice výrazný nárast odporu proti tečeniu kvapaliny. Tečenie kvapaliny je možné až po prekročení určitého šmykového napätia, resp. medze toku [2, 3], ktoré je charakteristické pre Binghamské kvapaliny (obr. 2-1).

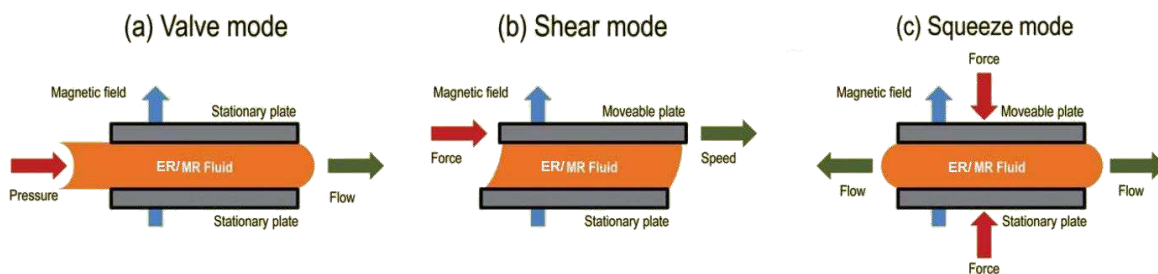


Obr. 2-1 Závislosť šmykového napätia na šmykovej rýchlosti kvapalín [3]

Podľa typu pôsobiaceho poľa rozlišujeme dve hlavné kategórie inteligentných kvapalín – magnetoreologické (MR) kvapaliny tvorené feromagnetickými kovovými práškami, ktoré reagujú na prítomnosť magnetického poľa a elektoreologické (ER) kvapaliny s polarizovateľnými časticami reagujúce na prítomnosť elektrického poľa [2]. Tieto typy kvapalín môžu mať rovnaké zloženie, ale líšia sa časticami rozptýlenými v nosnej kvapaline.

Častice rozptýlené v smart kvapaline vytvárajú výrazný rozdiel v správaní, ako bežne používané oleje. Aktiváciou externého aktívneho poľa narastá odpor proti tečeniu kvapaliny obsiahnutej medzi párom elektród budiace elektoreologický (ER) efekt, príp. pólov, ktoré budia magnetoreologický (MR) efekt. Podľa spôsobu zaťažovania rozdeľujeme smart kvapaliny do troch prevádzkových módo: prietokový, šmykový a tlakový mód (obr. 2-2) [4]. Prietokový mód je charakteristický pre regulačné ventily a pod. Šmykový mód umožňuje relatívny pohyb elektród (pólov) kolmo na aplikované pole, čo je výhodné pre aplikácie ako napr. brzdy, spojky alebo vibračné tlmiče. Tlakový mód

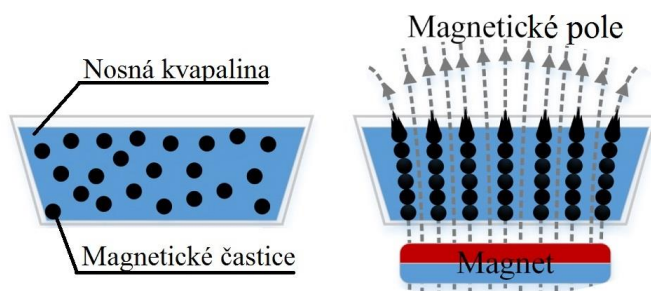
nastáva pri relatívnom pohybe elektród (pólov) v rovnobežnom smere s externým poľom. Smart kvapalina je namáhaná striedavým tlakom/táhom a z malej časti šmykom. Tento mód možno použiť pre rôzne potenciálne aplikácie, najmä z oblasti tlmenia vibrácií [4]. Vzhľadom k tomu, že spomínané smart kvapaliny reagujú na rozdielny typ externého pôsobenia, sú MR kvapaliny a ER kvapaliny podrobne popísané v separátnych kapitolách.



Obr. 2-2 Zaťažovacie módy smart kvapalín [4]

2.1 Smart kvapaliny ovplyvňované magnetizmom

Magnetická kvapalina, resp. MR kvapalina je koloidná zmes tvorená suspenziou mikroskopických častíc feromagnetickej látky rozptýlených v magneticky pasívnom médiu – nosnej kvapaline, ktorá je zložená zo základového oleja a aditív. Bez prítomnosti magnetického poľa vykazujú magnetické kvapaliny Newtonské správanie, pričom viskozita MR kvapaliny je konštantná a má približne rovnakú hodnotu ako viskozita nosnej kvapaliny. Pôsobením externého magnetického poľa sa magnetické častice začnú takmer okamžite zoskupovať do reťazcov podľa magnetických siločiar (obr. 2-3). Tento tzv. magnetoreologický efekt je reverzibilný po odstránení magnetického poľa [5]. V závislosti na podiele magnetických častíc obsiahnutých v kvapaline a sile magnetického poľa je čas aktivácie MR kvapaliny v jednotkách ms [6]. Takýto krátky čas odozvy umožňuje veľmi rýchlu zmenu reologických vlastností kvapaliny, vďaka čomu sa magnetické kvapaliny používajú pre rôzne aplikácie ako napr.: tlmiče, spojky, brzdy, senzory a pod. [7–11].



Obr. 2-3 Usporiadanie častíc v smart kvapaline pôsobením externého poľa [12]

Zloženie nosnej kvapaliny závisí od požadovaných tribologických a reologických vlastností. Jej viskozita by mala byť v závislosti na množstve obsiahnutých častíc v rozmedzí 200 – 300 mPa·s pri izbovej teplote [13]. Nosné kvapaliny by mali byť zároveň chemicky kompatibilné s materiálom častíc a zároveň aj s materiálom zariadení, v ktorých má byť MR kvapalina použitá. Rozsah operačných teplôt MR kvapalín je limitovaný použitou nosnou kvapalinou a pohybuje sa medzi -40 – 150 °C. Typickými nosnými kvapalinami sú silikónové, minerálne, parafínové alebo hydraulické oleje, silikónové kopolyméry, voda, príp. esterifikované mastné kyseliny. Preferovanou nosnou kvapalinou je polyalfaolefín (PAO), ktorá vykazuje pomerne veľký rozsah pracovných teplôt [14].

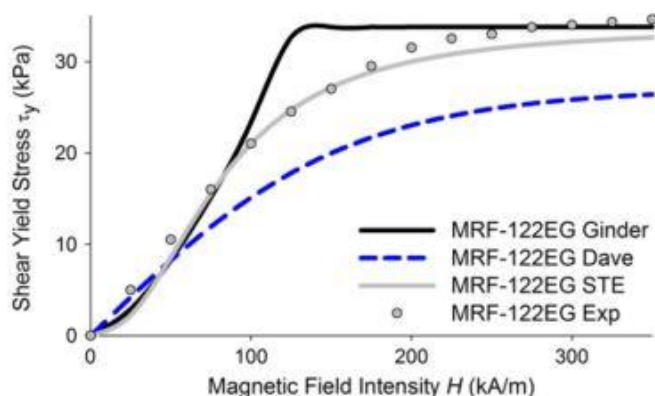
Vlastnosti tekutej fázy MR kvapalín je možné podľa potreby modifikovať vhodnými aditívami. Z tribologického hľadiska môžu mať aditíva vplyv na znižovanie trenia a opotrebenia povrchov, ktoré prichádzajú do kontaktu s MR kvapalinami. V prípade MR kvapaliny sú významné najmä stabilizátory, ktoré udržiavajú častice rozptýlené a zabráňujú sedimentácii. Dôležité sú taktiež surfaktanty pre zlepšenie povrchových vlastností rozptýlených častíc. Pre špecifické aplikácie sa používajú aj zahusťovadlá, a to najmä v prípade, kedy by mohlo dôjsť k separácii častíc a tekutej fázy. Rich a kol. [15] vo svojej odbornej práci skúmal stabilitu MR kvapaliny proti usádzaniu častíc vplyvom starnutia. Z jeho zistení vyplýva, že skúmaná kvapalina s podielom častíc 30 hm. % vykazuje po pridaní zahusťovadla znížený podiel usádzania častíc spôsobený syntetickou hlinou, ktorá vykazuje nárast medze toku so starnutím materiálu. Výsledkom je zmiernenie sedimentácie, významné najmä pri aplikáciách, u ktorých sa vyžaduje rovnomerné rozptýlenie častíc po dlhej dobe bez aktivácie, čo poukazuje na nezanedbateľný vplyv aditív v MR kvapalinách.

Magnetické častice sú tvorené jemným kovovým práškom reagujúcim na prítomnosť magnetického poľa. Podiel tuhej fázy komerčných MR kvapalín tvorí 20 – 48 %, pričom výsledná hustota je v závislosti na podiele častíc približne 2300 – 4120 kg·m⁻³, čo má za následok, že sú pomerne ťažké v porovnaní s bežne používanými olejmi. Táto tuhá fáza kvapaliny by mala vykazovať vysokú saturáciu, resp. hodnotu nasýtenia magnetickým poľom, a to približne 2 T [14]. Častice používané na výrobu MR kvapalín sú železo a železné zliatiny, karbonylové železo, železné oxidy, nikel, kobalt atď. Najčastejšie používané materiály tvoriace tuhú fázu MR kvapaliny sú práve čisté železo, príp. karbonylové železo, ktoré vykazujú pomerne vysokú saturáciu magnetizácie, asi 2,15 T, pri relatívne nízkej cene spomedzi ostatných materiálov používaných na výrobu MR kvapalín [2].

Veľkosť feromagnetických častíc sa pohybuje v rozmedzí 1 – 100 μm, obvykle sa však používajú MR kvapaliny s časticami o veľkosti približne 10 μm [16]. Častice väčšie ako 100 μm zapríčiňujú rušivé vplyvy v zariadeniach, nárast trenia a opotrebenia. Na druhej strane, častice s veľkosťou pod 1 μm nie sú schopné vyvinúť tak veľký odpor proti tečeniu ako kvapaliny s časticami v rozsahu 1 – 100 μm. Aj napriek

tomu má tento druh MR kvapaliny široké použitie v praxi ako tzv. ferrokvapaliny. Ide o kvapaliny s časticami menšími ako $1\text{ }\mu\text{m}$ (zvyčajne 10 nm), ktoré si zachovávajú tekutú formu, dokonca aj pri pôsobení silného magnetického poľa. Vďaka tejto vlastnosti môžu byť ferrokvapaliny použité ako tesniace médium pre dynamické tesnenia [17]. Zvyčajne sa používajú častice sférického tvaru kvôli dlhšej trvanlivosti, nízkemu treniu a magnetickej anizotropii. Okrem sférických častíc boli v minulosti aplikované aj suspenzie magnetických polymerizovaných reťazcov. Tieto reťazce vykazovali v porovnaní so sférickými časticami omnoho väčší odpor proti tečeniu, a to aj v prípade bez vplyvu magnetického poľa. Dôvodom vyššieho odporu je z hľadiska trenia schopnosť reťazcov tvoriť komplexnejší celok s kvapalinou. Nevýhodou polymerizovaných reťazcov je pomalšia odozva na pôsobenie magnetického poľa, ako v prípade častíc sférického tvaru kvôli nižšej magnetizácii [18]. Suspenzie MR kvapalín štandardne obsahujú častice s približne rovnakou veľkosťou. Viota a kol. [17] sa v experimentálnej práci zamerail na aplikáciu bimodálnych magnetických kvapalín, kde skombinoval dva typy častíc odlišných rozmerov. Pre experiment bola použitá suspenzia mikročastíc o veľkosti približne $1,5\text{ }\mu\text{m}$ a nanočastíc s veľkosťou približne 8 nm . Na základe výsledkov pozorovania bolo možné konštatovať, že nanočastice majú do určitej miery vplyv na stabilitu koloidnej zmesi a usadzovanie suspenzie.

Pre umožnenie analýzy MR kvapalín pomocou výpočtového softvéru vznikli viaceré štúdie zaoberajúce sa prípravou matematického modelu [19–21]. Na základe poznatkov o správaní MR kvapalín a výsledkov z experimentov bolo možné zostaviť matematický model MR kvapaliny reagujúci na intenzitu magnetického poľa, ktorý korešpondoval s komerčnou MR kvapalinou. Takýto model je tak možné jednoducho implementovať napr. do MKP softvéru, ktorý uľahčí návrh MR zariadení [12]. Na obr. 2-4 je zobrazené porovnanie matematického modelu State Transition Equation (STE) s ďalšími modelmi a výsledkami z experimentu MR kvapaliny. Z výsledkov vyplýva, že vyvinutý model STE najlepšie interpretuje správanie MR kvapaliny spomedzi ostatných modelov. Takto experimentálne overené modely MR kvapalín môžu výrazne znížiť náklady na výrobu MR zariadení a uľahčiť ich návrh pomocou CFD analýz pre overenie funkčnosti a úpravu geometrie.

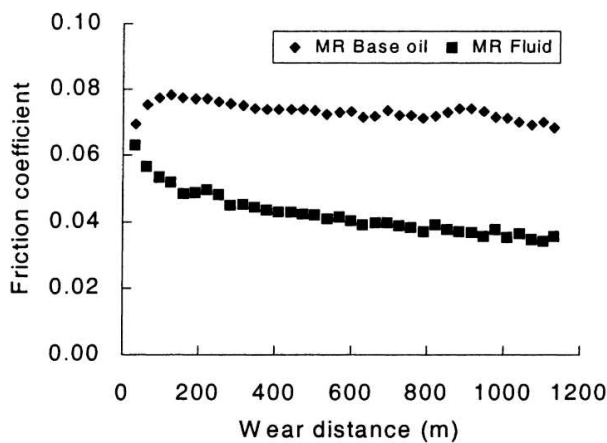


Obr. 2-4 Porovnanie matematických modelov a výsledkov experimentu [12]

2.1.1 Tribologické vlastnosti MR kvapalín

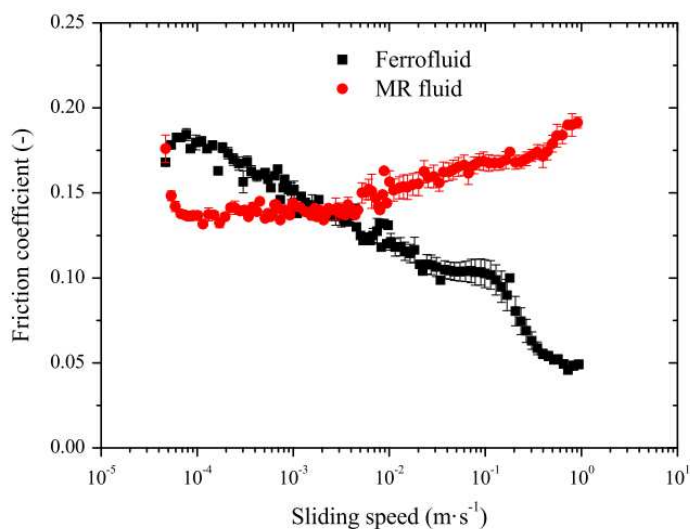
Častice rozptýlené v nosnej kvapaline môžu podľa typu namáhania a konštrukčného prevedenia mechanizmu spôsobovať rôzne typy opotrebenia. V prípade MR kvapalín ide najmä o abrazívne, príp. eróziívne opotrebenie kontaktných povrchov, a preto je potrebné porozumieť týmto negatívnym javom, aby bolo možné zamedziť ich vzniku, alebo aspoň minimalizovať rozsah poškodenia. Okrem mechanizmov opotrebenia je z tribologického hľadiska významná aj hodnota súčiniteľa trenia.

Doposiaľ boli tribologické charakteristiky MR kvapalín prevažne študované bez prítomnosti pôsobiaceho magnetického poľa [13,14]. Pozorovaním MR kvapalín bez externého pôsobenia sa zaoberal aj Wong a kol. [24], ktorý sa vo svojej experimentálnej práci zamerlal na porovnanie opotrebenia a trenia základového oleja bez pridaných mikroskopických častíc a MR kvapaliny s obsahom 32 hm. % tuhých sférických častíc s priemerom 1 – 5 μm tvorenou identickým základovým olejom – komerčne dostupným hydraulickým olejom Tellus T15. Experimenty prebiehali bez budenia magnetickým poľom a pri medznom režime mazania pri zaťažení 532 N a sklznej rýchlosti 0,325 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Z jeho zistení vyplýva, že nebudená MR kvapalina pri obsahu častíc 20 – 40 hm. % môže dosahovať nižšie hodnoty súčiniteľa trenia ako základový olej (obr. 2-5). Mimo tohto intervalu už MR kvapalina nedosahovala nižšie hodnoty v porovnaní so základovým olejom. V prípade opotrebenia vykazovala MR kvapalina horšie výsledky sprevádzané mechanizmami abrazívneho opotrebenia v závislosti na obsahu častíc. Správanie MR kvapaliny s veľmi malým obsahom častíc je veľmi podobné ako u minerálneho oleja. Akonáhle sa dostane veľké množstvo častíc do kontaktu, tak dochádza k zhukovaniu častíc čo vedie k abrazívnemu opotrebeniu.



Obr. 2-5 Porovnanie trecích vlastností základového oleja a MR kvapaliny [24]

Shahrivar a kol. [25] vykonal komparatívnu štúdiu tribologických vlastností MR kvapaliny s obsahom častíc 32 hm. % a ferrokvapaliny s obsahom častíc 5,5 hm. % v bodovom kontakte s čistým sklzom pri rôznych rýchlostiach a pri zaťažení 10 N, čomu zodpovedá vypočítaný maximálny kontaktný tlak p_{max} podľa Hertzovej teórie 634 MPa. Kontakty sa počas experimentov nachádzali v medznom a zmiešanom režime mazania. Na obr. 2-6 je zobrazený priebeh závislosti súčiniteľa trenia na klznej rýchlosti bez pôsobenia magnetického poľa. Z grafu je zrejmé, že ferrokvapaliny vykazujú lepšie trecie vlastnosti pri vyšších rýchlostiach, čo odzrkadľuje rozdiel vo veľkosti rozptýlených častíc skúmaných suspenzií. Väčšie častice MR kvapaliny by mali viesť k nižšiemu treniu kvôli menšiemu lokálnemu tlaku pri rovnakom zaťažení. Koncentrácia a veľkosť mikročastíc MR kvapaliny je omnoho väčšia ako u nanočastíc ferrokvapaliny, v dôsledku čoho dochádza k nárastu trenia z dôvodu vyššieho množstva parciálnych trecích kontaktov.

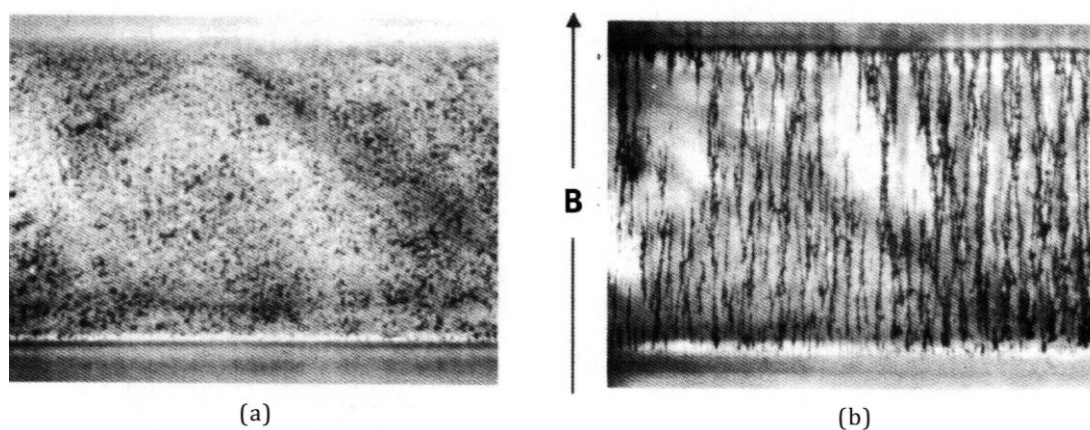


Obr. 2-6 Porovnanie trecích vlastností MR kvapaliny a ferrokvapaliny [25]

Viacere výskumy zamerané na pozorovanie opotrebenia MR kvapalín v stave bez prítomnosti aktívneho pôsobiaceho poľa [22–24] vykazujú zmeny tribologických vlastností magnetických kvapalín. Primárne ide o zmeny v hodnote súčiniteľa trenia v závislosti na rýchlosti. S ohľadom na možnosti, ktoré smart kvapaliny ponúkajú, sú štúdie zahrňujúce vplyvy externého poľa prínosnejšie. Z toho dôvodu sú v nasledovných kapitolách popísané vplyvy magnetického poľa na tribologické vlastnosti MR kvapalín.

2.1.2 Vplyv magnetického poľa na tribologické vlastnosti magnetických kvapalín

Pôsobením magnetického poľa na MR suspenziu tvorenou pevnými feromagnetickými časticami dochádza k aktivácii MR efektu. Častice formujú reťazce podľa smeru pôsobenia magnetického poľa (obr. 2-7), pričom dochádza k navýšeniu zdanlivej viskozity, ktorú je možno meniť intenzitou magnetického poľa [26].

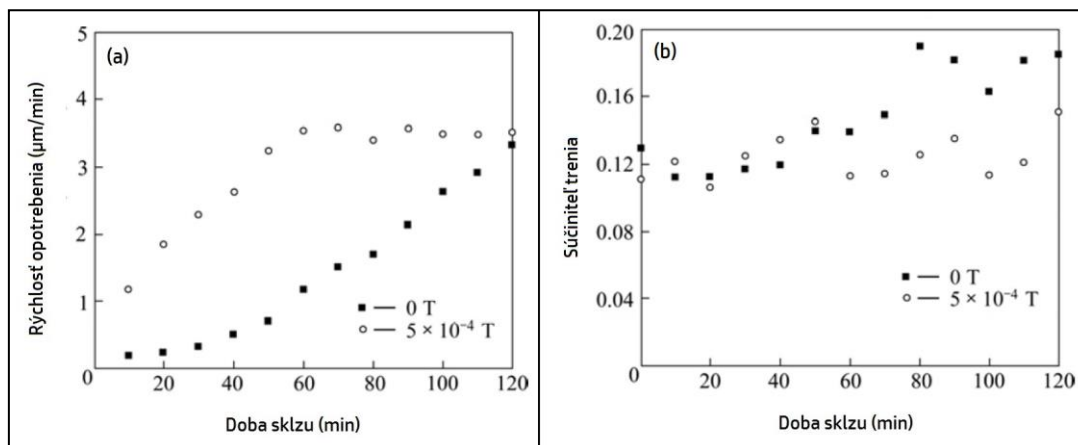


Obr. 2-7 MR suspenzia pred (a) a po pridaní magnetického poľa (b) [26]

Vzhľadom k tomu, že MR kvapalina je tvorená tuhými časticami, naskytuje sa možnosť použiť tieto suspenzie na dokončovacie operácie povrchov. Za prítomnosti magnetického poľa je možné dosiahnuť extrémne jemné povrchy obrobkov s minimálnym poškodením, keďže nedochádza k priamemu kontaktu s obrábacími nástrojmi. Tejto problematike sa venoval vo svojej experimentálnej práci zameranej na tribologické vlastnosti MR kvapalín v dokončovacích operáciách Seok a kol. [27]. Testovacie zariadenie pozostávalo z rotujúceho magnetu vytvárajúce permanentné magnetické pole. Škárrou medzi magnetom a obrobkom bol pôsobením magnetického poľa zabezpečený pohyb častíc, ktoré interagovali s povrchom obrobku. Výsledky výpočtového modelu overené experimentom naznačujú, že dominantným mechanizmom pri konečnej úprave povrchov pomocou MR kvapaliny je abrazívne opotrebenie. Tento zdanlivo nežiaduci jav je výhodný v prípade dokončovacích operácií povrchov. Abrazívnym médiom je možné dosiahnuť drsnosť povrchu R_a nižšiu ako $0,05 \mu\text{m}$ bez vzniku povrchových alebo podpovrchových defektov [28]. V prípade

experimentov naznačujú MR kvapaliny podobný trend pozitívneho účinku magnetického poľa na magnetické suspenzie. Počas pozorovania trecích charakteristík suspenzie s magnetickými časticami na „pin-on-disk“ tribometri bolo možné doceliť jemnejšiu drsnosť povrchu aktiváciou magnetického poľa o viac ako 30 % [29].

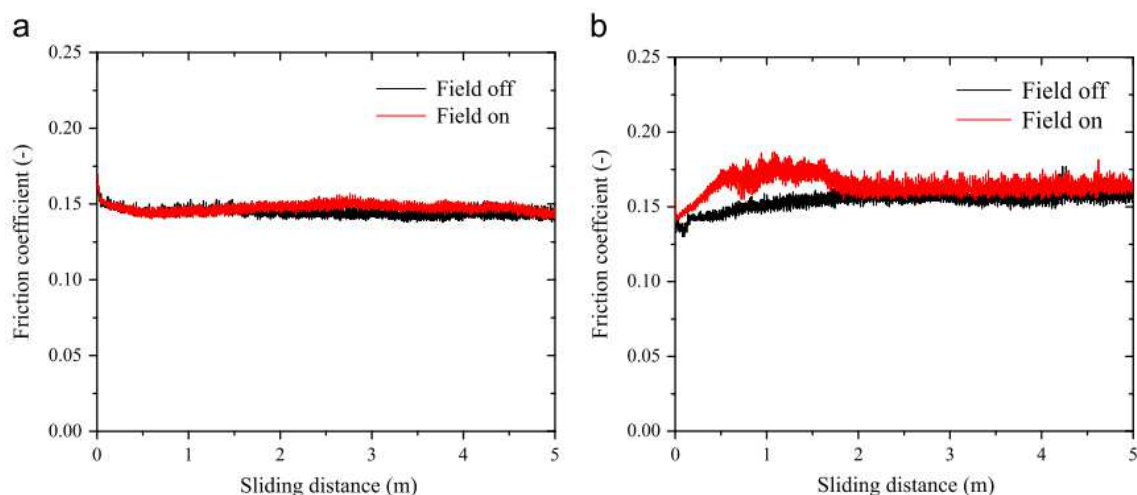
Tribologickými vlastnosťami MR kvapalín sa zaoberal aj Song a kol. [30], ktorý porovnával sklzové opotrebenie na kolíku prostredníctvom „pin-on-disc“, použitím disku a kolíka z mosadze. Vzorka MR kvapaliny obsahovala 32 hm. % častíc s veľkosťou (1 až 4) μm . Experiment bol prevedený pre dva stavy MR kvapaliny - bez magnetického poľa a za prítomnosti magnetického poľa o veľkosti 0,5 mT.



Obr. 2-8 Rýchlosť opotrebenia kolíka a súčiniteľ trenia s a bez magnetického poľa [30]

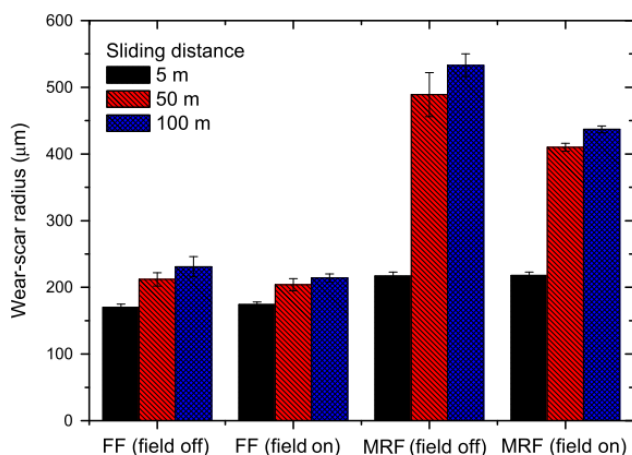
Ako je zobrazené na obr. 2-8 (a), rýchlosť opotrebenia pod vplyvom magnetického poľa počas prvých 60 min. prudko narastá a následne sa ustáli, zatiaľ čo rýchlosť opotrebenia kolíka bez ovplyvnenia magnetickým poľom rastie rovnomerne, a po určitom čase sa rýchlosť opotrebenia ustáli. Toto zistenie naznačuje, že magnetické pole má negatívny vplyv na rýchlosť opotrebenia v počiatočnej fáze, čo môže byť zapríčinené zhlučovaním kovových častíc. Na druhej strane, súčiniteľ trenia bez prítomnosti magnetického poľa vykazuje narastajúci trend, pričom súčiniteľ trenia pri pôsobení magnetického poľa má približne ustálený priebeh (obr. 2-8 (b)).

Štúdium trenia a opotrebenia v prítomnosti magnetického poľa v bodovom kontakte sa zaoberal aj Shahrivar a kol. [25] pri rovnakých podmienkach, ako bez aktivácie. Výsledky ukazujú, že v prítomnosti magnetov nevykazuje ferrokvapalina významný rozdiel v súčiniteli trenia (obr. 2-9 a). V porovnaní s ferrokvapalinou vykazuje MR kvapalina (obr. 2-9 b) nárast v súčiniteli trenia približne o 15 %. Výraznejšia zmena v prípade MR kvapaliny je spôsobená väčšou citlivosťou rozmernejších MR častíc.



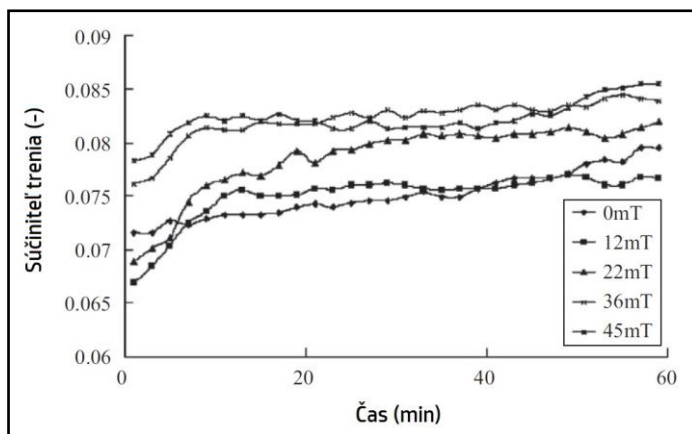
Obr. 2-9 Súčiniteľ trenia za prítomnosti magnetického poľa a) ferrokvapaliny b) MR kvapaliny [25]

Na druhej strane mala v tomto prípade prítomnosť magnetov pozitívne účinky na opotrebenie povrchov, pričom po trecích testoch bol pozorovaný menší rozsah opotrebenia [25]. V prípade ferrokvapaliny bola zmena v opotrebení veľmi malá. U MR kvapaliny mala prítomnosť magnetického poľa výraznejší vplyv na rádius opotrebenia a to najmä pri dlhších trecích testoch (obr. 2-10).



Obr. 2-10 Závislosť rádiusu opotrebenia na dĺžke trecej dráhy magnetických kvapalín [25]

Li-jun a kol. [31] sa zaoberal tribologickými vlastnosťami MR kvapaliny s nízkym obsahom Mn-Zn-Fe častíc (približne 6 hm. %) s veľkosťou častíc približne 20 nm v prítomnosti magnetického poľa o intenzite v rozmedzí 0 – 45 mT. Takýto nízky obsah malých častíc bol zvolený s cieľom minimalizovať trenie veľkých častíc MR kvapaliny za účelom zníženia opotrebenia a navýšenia nosnosti klzných ložísk a iných strojných súčastí, ako už bolo spomínané v práci podľa Uhlmann a kol. [32]. Pomocou štvorguličkového testeru bol analyzovaný súčiniteľ trenia na určenom časovom intervale pri rýchlosti 1450 min^{-1} a zaťažení 392 N. Priebeh súčiniteľa trenia sú zobrazené v grafe na obr. 2-11.



Obr. 2-11 Súčiniteľ trenia pre rôzne veľkosti intenzity magnetického poľa [31]

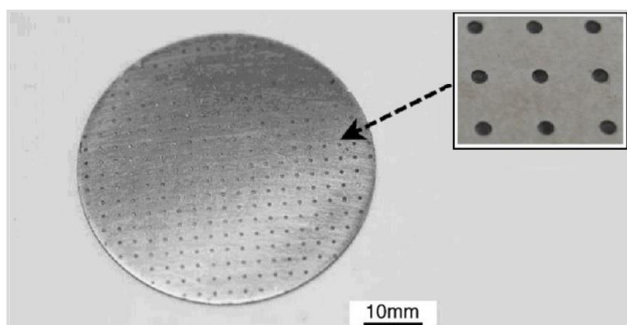
Pri pôsobení magnetického poľa s intenzitou 12 mT boli hodnoty tohto súčiniteľa najmenšie. V porovnaní so stavom bez pôsobenia magnetického poľa dochádza k redukcii súčiniteľa trenia, čo je možné odôvodniť tým, že použité častice obsahujúce disperzné činidlo formujú v mieste kontaktu ochranný film a zároveň zjemňujú stopy po opotrebení povrchov. V prípade pôsobenia magnetického poľa s vyššou intenzitou ako 12 mT zrejme dochádza k aglomerácii častíc, pričom dochádza navyšieniu viskozity MR kvapaliny. Okrem týchto zistení výsledky Wangovho experimentu naznačujú, že pôsobenie magnetického poľa urýchľuje absorpciu nanočastíc do povrchu, čo napomáha k jeho obnove. Z obr. 2-11 je však zrejmé, že navyšovaním intenzity magnetického poľa nad určitú hodnotu dochádza k nárastu hodnoty súčiniteľa trenia. Pri vysokej intenzite vytvára magnetické pole veľkú odporovú silu, čo má negatívny dopad na trecie charakteristiky MR kvapaliny [33, 34].

Ďalší experiment bol vykonaný na „pin-on-disc“ tribometri s cievkou vytvárajúcou magnetické pole. Pre experiment boli použité kolíky a disky z hliníka, mosadze a ocele [35]. MR kvapalina s podielom tuhých častíc 32% objemu vykazovala lepšie vlastnosti v prítomnosti magnetického poľa. Opotrebenie a súčiniteľ trenia zaznamenali výrazný pokles s rastúcou intenzitou magnetického poľa. Dominantným mechanizmom v prípade mosadzi a ocele bolo abrazívne opotrebenie. Z troch porovnávaných materiálov mal pod vplyvom magnetického poľa najhoršie tribologické vlastnosti práve hliník, u ktorého dochádzalo okrem abrazívneho mechanizmu opotrebenia aj k adhézii.

Podobným experimentom, ktorý prebiehal taktiež na „pin-on-disc“ tribometri, boli študované tribologické vlastnosti MR kvapalín s vyšším obsahom častíc, a to v rozmedzí 72 – 86 hm. % [36]. Podľa výsledkov získaných z meraní dochádzalo k výraznému navyšieniu trenia za prítomnosti magnetického poľa. Nárast súčiniteľa trenia v tomto prípade je zrejme spôsobený pomerne veľkým podielom tuhých častíc v MR kvapaline, ktoré pôsobením magnetického poľa vytvárajú príliš veľký odpor proti tečeniu kvapaliny, čím obmedzujú mazanie kontaktnej oblasti. Vplyvom nehomogénneho magnetického poľa na správanie maziva v poddajnom polymérovom kontakte mazanom ferrokvapalinou sa zaoberal Sharivar a kol. [37]. Podľa jeho zistení je možné pri vhodných

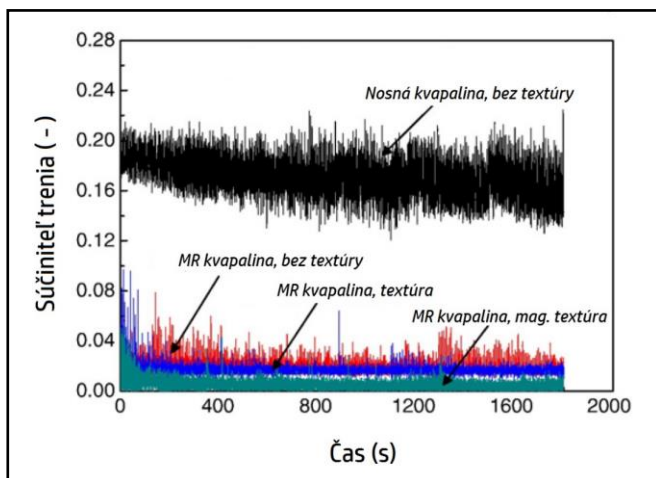
podmienkach docieľiť zníženie trenia modifikáciou distribúcie toku magnetického poľa posunutím magnetu. Toto tvrdenie overil experimentálne aj simuláciou, pričom výsledky ukazovali rovnaký trend a porovnateľné hodnoty súčiniteľa trenia.

Okrem spomínaných účinkov, ktoré majú vplyv na trecie vlastnosti MR kvapaliny je možné do určitej miery modifikovať súčiniteľ trenia aj textúrou mazaných kontaktných povrchov. Shen a kol. [38] vo svojej experimentálnej práci skúmal správanie maziva povrchov s rôznymi textúrami. Trenie nosnej kvapaliny bez textúry bolo porovnané s MR kvapalinou s povrchom bez textúry, s bežnou textúrou povrchu a so špeciálnou magnetickou textúrou, ktorá bola vytvorená za predpokladu zlepšenia mazacej funkcie MR kvapaliny. Magnetická textúra bola vyrobená pomocou fotolitografie a skladá sa z drobných jamiek vyplnených magnetickým filmom (obr. 2-12).



Obr. 2-12 Disk s magnetickou textúrou [38]

Porovnávacie experimenty prebiehali na zariadení s konfiguráciou „pin-on-disk“. Pri nízkych sklzových rýchlostiach vykazovala MR kvapalina s obsahom 4,83 hm. % výrazne nižší súčiniteľ trenia v porovnaní s jej nosnou kvapalinou. Tento rozdiel bol ešte výraznejší s navyšujúcou sa záťažou. Priebeh súčiniteľa trenia je zobrazený na obr. 2-13 pri rýchlosti $13 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a zaťažení 20 N, odpovedajúce kontaktnému tlaku 0,25 MPa. Nevýhodou magnetickej textúry je, že spôsobuje nárast súčiniteľa trenia pri vyšších sklzových rýchlostiach v prípade mazania MR kvapalinou [38].



Obr. 2-13 Priebehy súčiniteľa trenia pre rôzne textúry [38]

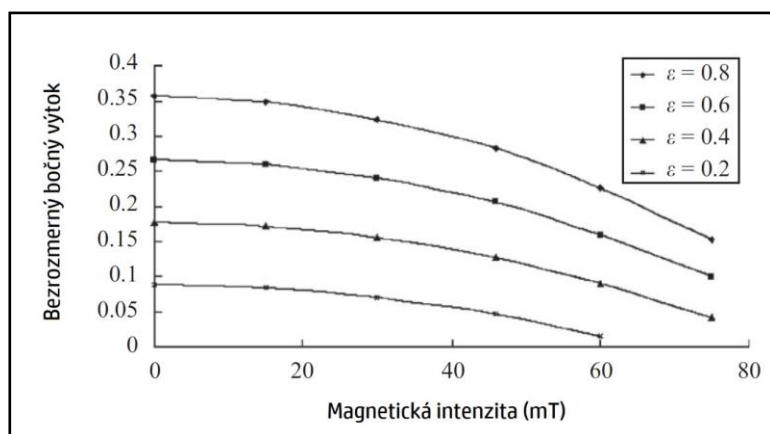
2.1.3 Vplyv magnetického poľa na hrúbku mazacieho filmu

Intenzitou pôsobiaceho magnetického poľa je možné meniť reologické vlastnosti a správanie magnetických kvapalín. Externé magnetické pole zapríčiňuje zmenu viskozity, pričom dochádza aj k ovplyvneniu mazacej funkcie a navýšeniu nosnosti MR kvapaliny [32]. Nedávny experiment zameraný na pozorovanie MR kvapaliny v klznom ložisku potvrdil možnosť navýšenia nosnosti MR kvapaliny pôsobením magnetického poľa [39]. Vzhľadom k požiadavkám navyšovania nosnosti mechanizmov a trendu znižovania hrúbky mazacej vrstvy sa naskytuje možnosť aplikovať MR kvapaliny ako náhradu za komerčné mazivá, keďže ich vlastnosti je možné meniť externým pôsobením.

Mazanie MR kvapalinami, konkrétne ferrokvapalinami, zhrnul v odbornom článku Huang a kol. [40]. Veľkosť častíc ferrokvapaliny je menšia v porovnaní s MR kvapalinami, v dôsledku čoho majú taktiež menšie množstvo parciálnych trecích kontaktov. Ferrokvapalina ako mazivo je výhodná pre redukciu trenia, pretože je pôsobením externého poľa udržiavaná v požadovanom mieste. Týmto spôsobom sa naskytuje možnosť ovplyvniť správanie maziva v kontakte a zamedziť hladovaniu kontaktov. Toto tvrdenie bolo neskôr potvrdené ďalším experimentom s ferrokvapalinami pre zamedzenie migrácie maziva [41]. Výsledky ukazujú, že ferrokvapaliny vykazujú tzv. „anti-migračné“ správanie pod vplyvom externého magnetického poľa. Pôsobením magnetického poľa bolo mazivo vťahované späť do kontaktu, čím napomáhalo obnovovať mazaciu vrstvu. Zamedzenie hladovania kontaktnej oblasti je v mnohých prípadoch závažný problém, ktorý by mohol byť vo veľkej miere v prípade MR kvapalín zamedzený práve vytvorením magnetického poľa v okolí kontaktnej oblasti [42]. Touto problematikou sa zaoberala aj štúdia zameraná na ovládanie hladovania maziva v kontakte guľička-disk pri sklzových-valivých podmienkach s použitím ferrokvapaliny zloženej z 5,5 hm. % a 9 nm feromagnetickými časticami. Kontaktná oblasť rotačného hliníkového disku a elastomérovej guľičky bola budená magnetmi uloženými pod kontaktom. Výsledky naznačujú, že je možné redukovať hladovanie maziva použitím magnetického poľa blízko kontaktnej oblasti [43].

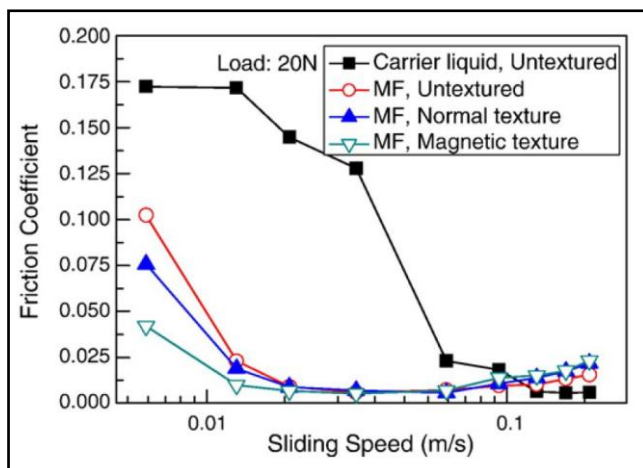
Shahrivar a kol. [25] sa v experimentálnej práci zaoberal porovnaním MR s obsahom častíc 32 hm. % a ferrokvapaliny s obsahom častíc 5,5 hm. % v bodovom kontakte pri maximálnom kontaktnom tlaku 634 MPa. Test prebiehal v dvoch stavoch: bez vplyvu magnetického poľa a následne aj v jeho prítomnosti. Prítomnosťou magnetického poľa však nebola dosiahnutá žiadna výrazná zmena. Kvôli veľkosti a aglomeráciám častíc sa MR kvapaliny nachádzali v celom rozsahu experimentu v medznom režime mazania, podobne ako uviedol vo svojej práci Bombard a kol. [44]. Ferrokvapaliny sa pri nižších rýchlostiach nachádzali v medznom režime mazania, následne navýšením rýchlosti dochádzalo k znižovaniu súčiniteľa trenia, pravdepodobne kvôli vzniku mazacej vrstvy oddeľujúcej trecie povrchy.

Wang a kol. [31] sa zamerail na skúmanie MR kvapaliny s nízkym obsahom Mn-Zn-Fe častíc, približne 6 hm. %. Povrchy guľičiek štvorguľičkového testeru mazané touto suspenziou boli pozorované skenovacím elektrónovým mikroskopom (SEM). Z hľadiska mazania bol najvýznamnejší test zameraný na výtok maziva pri premenlivej intenzite magnetického poľa. Z grafu na obr. 2-14 je zrejmé, že pôsobením magnetického poľa je možné pri vhodných podmienkach obmedziť výtok z kontaktnej oblasti. Pri nízkej excentricite kontaktu ($\varepsilon = 0,2$) dochádza s rastúcou magnetickou intenzitou k výraznému poklesu bočného výtoku.



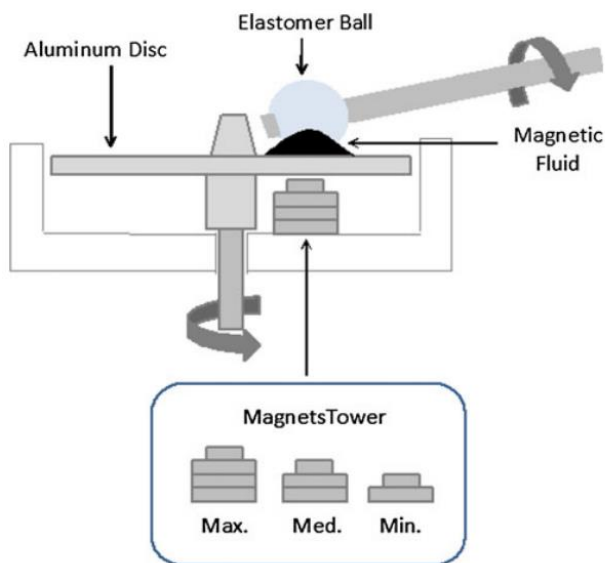
Obr. 2-14 Závislosť bočného výtoku na intenzite magnetického poľa [31]

Shen a kol. [38] svoju experimentálnu prácu zamerail na štúdium špeciálnej textúry povrchov vzoriek mazaných MR kvapalinou s časticami o veľkosti 15 nm. Ako už bolo predtým spomenuté, použitím textúry je možné dosiahnuť zníženie súčiniteľa trenia. Okrem trecích vlastností boli pozorované aj správanie maziva MR kvapaliny. Na základe výsledkov došiel k záveru, že pri nižších rýchlostiach dochádza k efektívnejšiemu mazaniu ako v prípade nosnej kvapaliny pri záťaži 20 N (obr. 2-15), pričom bol tento trend výraznejší ako pri nižších záťaženiach. V oblasti medzného a zmiešaného režimu mazania vykazuje MR kvapalina tzv. „anti-friction“ efekt, zapríčinený geometriou povrchu, resp. textúrou, ktorá pôsobí ako zásobník oleja a zlepšenou distribúciou maziva pri pôsobení magnetického povrchu na častice MR kvapaliny. Pri vysokých sklzových rýchlostiach, kedy je už plne formovaný kvapalinový mazací film, dochádza vplyvom magnetického poľa k navýšeniu viskozity, čo zapríčiňuje nárast trenia v dôsledku ovplyvnenia toku textúrou povrchu [38].



Obr. 2-15 Stribeckova krivka MR kvapaliny textúrovaných vzoriek [38]

V súvislosti s mazaním kontaktnej oblasti pomocou MR kvapaliny vznikla štúdia zameraná na hladovanie v EHD mazanom kontakte, pri ktorej bol použitý modifikovaný Binghamský model reprezentujúci MR kvapalinu v aktivovanom stave [42]. Správanie modelu MR kvapaliny bolo riadené prostredníctvom napätia medzi sklzu, čo je funkciou externého elektrického poľa. Na základe výsledkov bolo konštatované, že kvôli nedostatočnému prísunu maziva dochádza k zužovaniu mazacej vrstvy, čo môže spôsobovať nárast trenia až opotrebenie povrchov z dôvodu hladovania maziva v kontaktnej oblasti. Týmto problémom sa zaoberala aj ďalšia štúdia, ktorá bola zameraná na reguláciu hladovania maziva na v kontakte guľičky a disku s použitím ferrokvapaliny zloženej z 5,5 hm. % 9 nm častíc. Kontaktná oblasť rotačného hliníkového disku a elastomérovej guľičky bola buď magnetmi umiestnenými priamo pod ňou (obr. 2-16). Výsledky testu naznačujú, že je možné regulovať hladovanie maziva s použitím magnetov umiestnených v blízkosti kontaktnej oblasti [43].



Obr. 2-16 Schematické zobrazenie experimentálneho zariadenia [43]

2.1.4 Zhrnutie experimentálnych meraní magnetických kvapalín

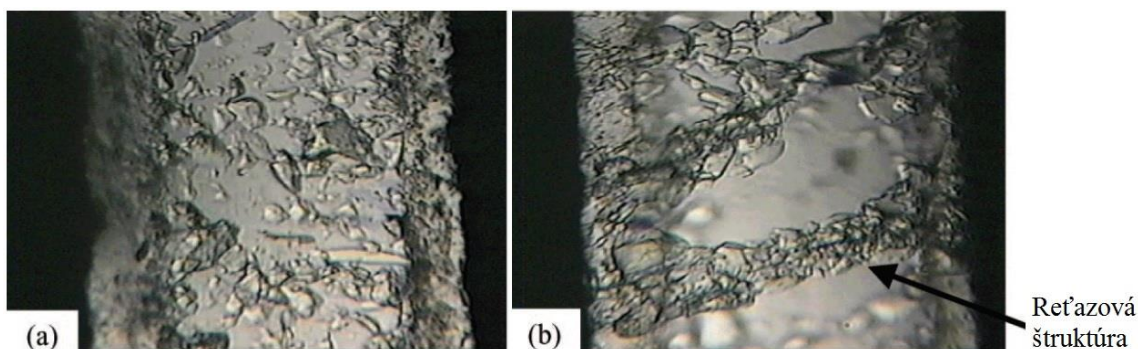
Pre prehľadnosť pri výbere vzorky a vhodnej metódy boli vybrané experimentálne práce zahrňujúce testy s magnetickými kvapalinami. Najvýznamnejšie experimentálne štúdie magnetických kvapalín s buđením magnetickým poľom sú uvedené v tab. 2-1 spolu s vybranými vlastnosťami a zaťažovacími podmienkami.

Tab. 2-1 Zhrnutie vybraných experimentov magnetických kvapalín

Autor	Vzorka	Viskozita 25 °C [mPa·s]	Experimentálne zariadenie	Zaťažovacie podmienky	Dosiahnuté výsledky
Li-Jun a kol. 2009 [31]	Ferrokvapalina 20 nm častice 6 hm. %	-	Štvorguličkový tester	0 – 80 mT 392 N	Nižší súčiniteľ trenia, znížený bočný výtok
Shen a kol. 2009 [38]	Ferrokvapalina 15 nm častice 4,83 hm %	67	pin-on-disc tribometer	0 – 10 mT 20 N	Nižší súčiniteľ trenia
Reyes a kol. 2010 [43]	Ferrokvapalina 9 nm častice 5,5 hm. %	46 – 560	ball-on-disc tribometer	0 – 150 mT 7 N	Redukcia hľadovania kontaktu
Song a kol. 2013 [30]	MR kvapalina 1 – 4 µm častice 32 hm. %	92 ± 15	pin-on-disc tribometer	0,5 mT 20 – 100 N	Nižší súčiniteľ trenia, menšie opotrebenie
Shahrivar a kol. 2014 [25]	Ferrokvapalina 5,5 hm. % MR kvapalina 32 hm. %	160 520	ball-on-3-plates tribometer	14 mT 10 N 634 MPa	Nárast súčiniteľa trenia, nižšie opotrebenie
Zhang a kol. 2015 [29]	MR kvapalina 72 – 86 hm. %	42 – 280	pin-on-disc tribometer	9 mT 10 N	Nárast súčiniteľa trenia

2.2 Smart kvapaliny ovplyvňované elektrinou

ER kvapaliny sú smart kvapaliny reagujúce na impulz elektrického poľa zmenou reologických vlastností [45]. Môžu mať prirodzenú vlastnosť ER odozvy, alebo môžu byť tvorené formou suspenzií alebo emulzií. ER kvapaliny sa líšia od MR kvapalín typom častíc, resp. prímiesou a stimulátorom, ktorý aktivuje ER efekt. Častice tvoriace ER kvapalinu reagujú na prítomnosť elektrického poľa výrazným navýšením odporu proti tečeniu ER kvapaliny, čo je spôsobené formovaním reťazových štruktúr podľa siločiar poľa (obr. 2-17).



Obr. 2-17 ER kvapalina bez pôsobenia elektrického poľa (a) a s elektrickým poľom (b) [46]

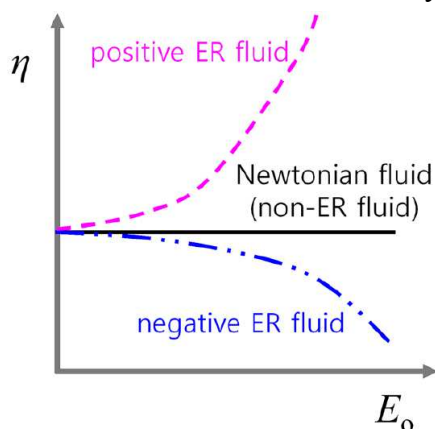
Nárast odporu je takmer okamžitý a veľkosť odporu je závislá na intenzite elektrického poľa a podiele ER častíc, resp. látky citlivej na pôsobenie elektrického poľa. ER efekt je plynule regulovateľný pomocou intenzity elektrického poľa a po odstránení pôsobenia elektrického poľa sa ER kvapalina vráti do pôvodného stavu. Intenzita elektrického poľa sa pohybuje v závislosti na množstve a type budenej látky až $10^{10} \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ [47]. Vzhľadom k možnosti plynulej regulácie pomocou intenzity elektrického poľa sú ER kvapaliny výhodné pre aplikácie vyžadujúce plynulú reguláciu, ako napr. regulačné ventily a pod. [48]

Niektoré ER kvapaliny majú prirodzenú vlastnosť odozvy na elektrické pole. Takýmito látkami sú napr. iónové kvapaliny, teda soli v kvapalnom stave obsahujúce organické alebo anorganické kationy a anióny so schopnosťou meniť reologické vlastnosti v závislosti na elektrickom poli. Iónové kvapaliny majú dobrú chemickú a teplotnú stálosť a sú nehorľavé [49]. Nosná kvapalina suspenzií a emulzií je tvorená izolačným olejom alebo inou nevodivou tekutinou s vysokou chemickou stabilitou a aditívami. Najčastejšie používané oleje tvoriace základ nosnej kvapaliny sú napr. transformérové, silikónové, minerálne alebo rastlinné oleje, kerozín, parafín a pod. Viskozita nosnej kvapaliny by sa mala v ideálnom prípade pohybovať pod hodnotou $1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$. Oleje s vyššou hustotou, ako napr. fluoro-silikónové oleje alebo fenyl-silikónové oleje sa používajú z dôvodu nižšej rýchlosti sedimentácie častíc, a preto je vhodné, aby bola hustota nosnej kvapaliny vyššia ako 1200 kg/m^3 . V prípade ER kvapalín je dôležitým parametrom prierezová odolnosť, ktorá by mala byť viac ako 7 kV/mm [50]. Pre zlepšenie vlastností nosnej kvapaliny sa pridávajú rôzne aditíva. Používajú sa materiály, ktoré môžu byť adsorbované na povrch

častíc a zlepšiť ER efekt, sedimentačné, príp. tribologické alebo iné vlastnosti ER kvapaliny. Najbežnejšie používanými aditívami sú voda, kyseliny, zásadité soli a surfaktanty. Voda nie je vhodná pre niektoré aplikácie, pretože pri vysokej teplote dochádza k vyparovaniu vody a strate ER efektu [51].

Častice ER kvapaliny sú volené na základe určitých fyzikálnych vlastností, ktoré ovplyvňujú intenzívnosť ER efektu. Dôležité sú najmä vlastnosti ako vodivosť častíc, frekvencia elektrického poľa, dielektrické vlastnosti častíc a pod. Veľkosť týchto častíc sa obvykle pohybuje v rozmedzí 0,1 – 100 μm [52]. ER častice môžu byť tvorené rôznymi materiálmi, od keramiky cez organické materiály až po polyméry. Okrem tuhých častíc môžu byť ER kvapaliny tvorené formou emulzie alebo iba základnou látkou, ktorá je citlivá na elektrické pole. V prípade tekutiny rozpustenej v nosnom médiu nedochádza k problémom so sedimentáciou častíc. Niektoré tekutiny môžu vykazovať výraznejší ER efekt ako tuhé častice, a to najmä kvapalné kryštály, iónové kvapaliny a pod. [50, 53].

Ak dochádza k navýšeniu šmykového napätia a viskozity vplyvom elektrického poľa, hovoríme o tzv. pozitívnom ER efekte. V opačnom prípade, kedy dochádza k znižovaniu zdanlivej viskozity v prítomnosti elektrického poľa, nastáva negatívny ER efekt. Pribeh závislosti viskozity na elektrickom potenciáli je zobrazený na obr. 2-18 [54].



Obr. 2-18 Závislosť viskozity na elektrickom potenciáli [54]

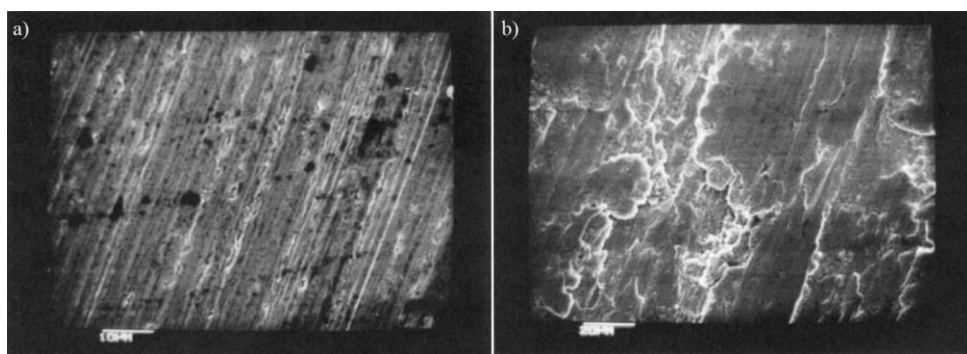
Materiály spôsobujúce ER efekt je možné podľa vplyvu elektrického poľa rozdeliť do dvoch skupín [50]:

- pozitívne ER materiály, u ktorých dochádza k navyšovaniu reologických vlastností s rastúcou intenzitou elektrického poľa. Do tejto skupiny patrí väčšina doposiaľ známych ER materiálov. Medzi pozitívne ER materiály patria: aluminosilikáty, polyméry, materiály na báze uhlíka (fulerény), supravodivé materiály, iónové kvapaliny, tekuté kryštály atď.
- negatívne ER materiály, ktoré sa prejavujú poklesom reologických vlastností s rastúcou intenzitou. Medzi materiály vykazujúce negatívny ER efekt patria: pyrogénny oxid kremičitý, segmentovaný polyuretán, hydroxid horečnatý atď.

2.2.1 Tribologické vlastnosti ER kvapalín

Vzhľadom k tomu, že ER kvapaliny môžu byť tvorené formou suspenzií, emulzií alebo roztokov, zovšeobecniť tribologické charakteristiky ER kvapalín je takmer nemožné. Hlavný rozdiel spočíva vo veľkosti a obsahu polarizovateľných častíc budiacich ER efekt. Použitím kvapalín s rozptýlenými časticami môže dochádzať podľa spôsobu namáhania a veľkosti častíc k niektorým mechanizmom opotrebenia, najčastejšie ide o adhéziu a eróziu. Erózia môže byť obzvlášť intenzívna v prípade ER kvapalín, u ktorých dochádza okrem mechanických a chemických vplyvov aj k elektrickému, príp. elektrochemickému účinku aktiváciou elektrického poľa.

V experimente podľa Lingarda a kol. [55] bola na „pin-on-disk“ zariadení pozorovaná ER kvapalina s časticami z polymetakrylátovej soli o veľkosti približne 12 μm a podiele 30 hm. %. Interakciou nerovností povrchu a rozptýlených častíc dochádzalo k rozsiahlej delaminácii povrchu a k zhlukovaniu častíc, pričom prevažoval adhézny mechanizmus opotrebenia. ER kvapalina bola zrovnávaná s komerčným olejom Tellus 46, ktorý mal v kontraste s ER kvapalinou omnoho nižšiu treciu silu a nevykazoval tak výrazné opotrebenie. Na obr. 2-19 je zobrazený opotrebený povrch po prevádzke s olejom Tellus 46 (a) a ER kvapalinou (b).



Obr. 2-19 Opotrebenie povrchu pri použití oleja Tellus (a) a ER kvapaliny (b) [55]

Takto výrazné opotrebenie u ER kvapaliny bolo dosiahnuté už pri polovičnej záťaži a omnoho kratšej dobe ako v prípade oleja Tellus 46. V porovnaní s nosnou kvapalinou bol u ER kvapaliny zaznamenaný pokles trecej sily asi o 20 %, čo môže naznačovať, že častice sa dokážu dostať do kontaktnej zóny a ovplyvniť správanie kontaktu.

Podobný experiment, ktorý rovnako prebiehal na „pin-on-disk“ tribometri uskutočnil Choi a kol. [46] s cieľom pozorovať rozsah opotrebenia na kolíkoch z troch rôznych materiálov (hliník, meď a oceľ) pri použití ER kvapaliny skladajúcej sa zo silikónového oleja a častíc z fosforovaného škrobu s podielom 30 hm. %. Všetky experimenty naznačovali rovnaký trend, kedy po úvodnej fáze pri zvyšujúcej sa rýchlosti došlo k poklesu a ustáleniu úbytku materiálu kolíkov. Najvýraznejšie opotrebenie bolo v prípade kolíka z hliníka, kedy dominovalo abrazívne opotrebenie. U medi je opotrebenie menej výrazné a v prípade ocele najmenej. Pre porovnanie boli merania s ER kvapalinou zrovnávané

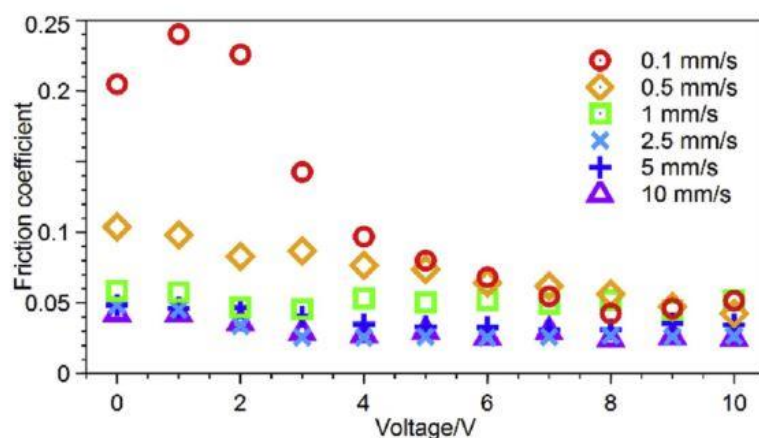
s nosnou kvapalinou. Výsledky naznačujú, že prítomnosť častíc má stabilizačný účinok na opotrebenie povrchov, avšak v porovnaní so základovým olejom dochádza k väčšiemu úbytku materiálu.

Vzhľadom k tomu, že spomínané štúdie sa zaoberajú ER kvapalinami bez prítomnosti elektrického poľa, a preto dochádza k výraznejšiemu opotrebeniu z dôvodu rozptýlených mikroskopických častíc. Aby bolo možné objasniť správanie ER kvapalín a ich vplyv na tribologické vlastnosti systému v aktivovanom stave, je nutné pre podobné experimenty zahrnúť aj pôsobenie elektrického poľa. Takéto ER kvapaliny sú podrobnejšie popísané v nasledujúcej kapitole.

2.2.2 Vplyv elektrického poľa na tribologické vlastnosti ER kvapalín

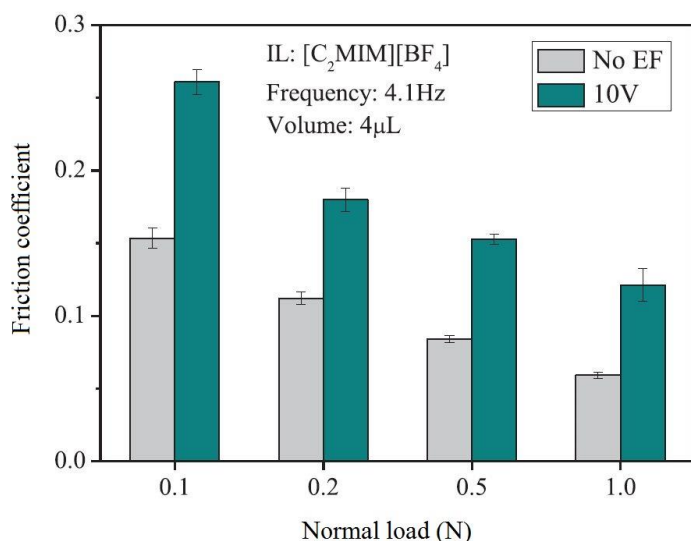
Niektoré smart kvapaliny reagujú na pôsobenie elektrického poľa. U týchto ER kvapalín dochádza k zmene reologických vlastností vplyvom elektrického poľa, podobne ako u MR kvapalín. V prípade ER kvapalín sa okrem suspenzií používajú aj emulzie s prísadou vykazujúcou ER efekt (napr. kyseliny) v prítomnosti elektrického poľa, ktoré sú výhodné najmä pre dobré sedimentačné vlastnosti. Takéto ER kvapaliny boli aplikované Luom a kol. [56], pre štúdium tribologických vlastností pod vplyvom vonkajšieho elektrického poľa na experimentálnom zariadení „ball-on-disc“. Výsledky testov naznačujú, že trecia sila úzko súvisí s napätím externého poľa. Hodnota súčiniteľa trenia sa pri nižších rýchlostiach mierne navýšila vplyvom elektrického poľa. Pri vyšších rýchlostiach k žiadnemu výraznému ovplyvneniu nedochádzalo a súčiniteľ trenia mal aj pod vplyvom navyšujúceho sa napätia elektrického poľa v rozmedzí (0 až 40) V približne ustálený priebeh.

Podobné výsledky boli dosiahnuté počas skúmania ER kvapaliny obsahujúcej molekuly tekutého kryštálu pomocou „ball-on-disc“ tribometru [57]. Kvapalina s viskozitou 26 mPA·s pri 25 °C bola aplikovaná na povrch disku v kontakte s guľičkou so zaťažením 2 N, ktoré zodpovedá Hertzovmu kontaktnému tlaku 323 MPa. Rovnako ako v predošlom prípade nenastávali žiadne výrazné zmeny trecích vlastností počas chodu za vysokých rýchlostí. Pri rýchlostiach nižších ako 1 mm·s⁻¹ dochádzalo pri navyšovaní napätia k znižovaniu súčiniteľa trenia (obr. 2-20). Takéto správanie bolo údajne zapríčinené orientáciou molekúl v smere pôsobiaceho elektrického poľa.



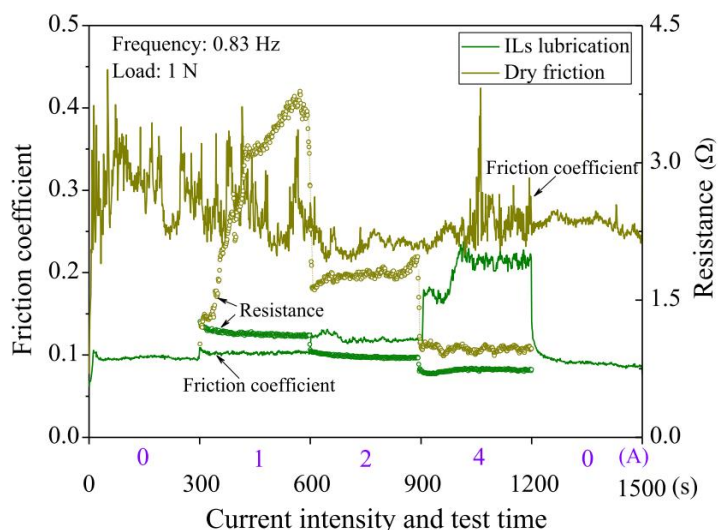
Obr. 2-20 Závislosť súčiniteľa trenia na napätí [57]

Na rozdiel od spomínaných emulzií, iónové kvapaliny vykazovali už pri napätí v rozsahu 5 – 10 V výrazný nárast súčiniteľa trenia [58]. V experimente boli porovnávané tri iónové kvapaliny. Najväčší rozdiel bol zaznamenaný pri testovaní kvapaliny 1-Ethyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate ($[\text{C}_2\text{MIM}][\text{BF}_4]$) s viskozitou v nebudenom stave 41 mPa·s, pričom hodnota súčiniteľa trenia bola pôsobením elektrického poľa takmer dvojnásobná. Tento trend bol rovnaký aj v prípade navyšovania záťaže (obr. 2-21), pri experimentálnych podmienkach bodového kontaktu zaťaženého 0,1 – 1 N, čo odpovedá kontaktnému napätiu 210 – 454 MPa. Súčiniteľ trenia bol vyhodnocovaný recipročným testerom s frekvenciou 4,1 Hz s výchylkou 1 mm, čo odpovedá priemernej rýchlosti približne 8 mm·s⁻¹. Nárast súčiniteľa trenia vplyvom elektrického poľa je odôvodnený ako dôsledok prichytávania alkylových reťazcov k polarizovaným povrchom, dôsledkom čoho dochádza k nárastu efektívnej viskozity [58].



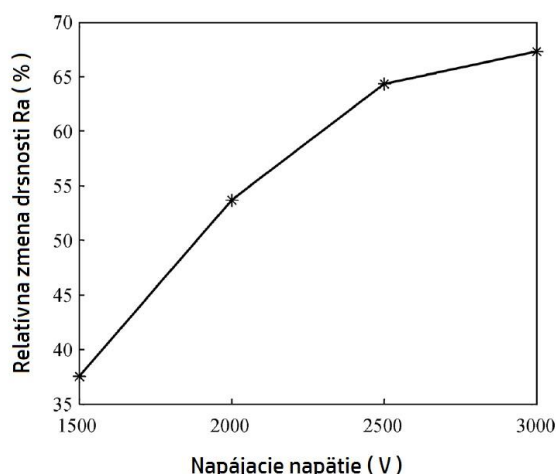
Obr. 2-21 Súčiniteľ trenia pre rôzne zaťažovacie podmienky [58]

Ďalšie trecie testy s iónovými kvapalinami ukazujú, že prítomnosťou elektrického poľa je možné takmer skokovo meniť súčiniteľ trenia [59]. V porovnaní so suchým trením nedochádzalo k výboju z dôvodu uzatvorenia elektrického oblúku. V prípade iónových kvapalín bol zaznamenaný výrazný nárast súčiniteľa trenia s navyšovaním elektrického prúdu. Počas meraní bol aplikovaný pomerne vysoký prúd, až 4 A. Po odpojení elektrického obvodu nastal výrazný pokles súčiniteľa trenia na približne rovnaké hodnoty ako pred budením (obr. 2-22). Nárast súčiniteľa trenia bol odôvodnený, ako dôsledok prechádzajúceho prúdu, ktorý má tendenciu narúšať mazací film, čo spôsobuje vyšší počet parciálnych trecích kontaktov, ktoré počas trenia interagujú.



Obr. 2-22 Závislosť trenia na elektrickom prúde iónovej kvapaliny [59]

Podobne ako v prípade MR kvapalín, ER kvapaliny je možné použiť na dokončovacie práce povrchov [60]. ER kvapaliny nachádzajú svoje využitie pre leštenie optických povrchov, u ktorých je potrebné dosiahnuť čo najvyššej kvality povrchov. odoberanie materiálu je zapríčinené prítomnosťou abrazívnych častíc ER kvapaliny. Rýchlosť odoberania materiálu závisí primárne na množstve a veľkosti abrazívnych častíc. Profil a drsnosť optických povrchov s použitím ER kvapaliny za prítomnosti elektrického poľa pozoroval Cheng a kol. [61]. Experimenty boli vykonávané na K9 zrkadle v rozsahu relatívne vysokých napätí 1500 – 3000 V, pričom hodnota drsnosti R_a dosiahnutá touto metódou bola 2,5 nm. Veľkosť napájacieho napätia nemala výrazný vplyv na výslednú drsnosť povrchu. S navyšujúcim sa napätím však narastala relatívna zmena hodnoty drsnosti R_a (obr. 2-23). Na základe výsledkov je možné konštatovať, že napätie nemá významný vplyv na kvalitu obrobeného povrchu, ale je možné urýchliť proces odoberania materiálu.

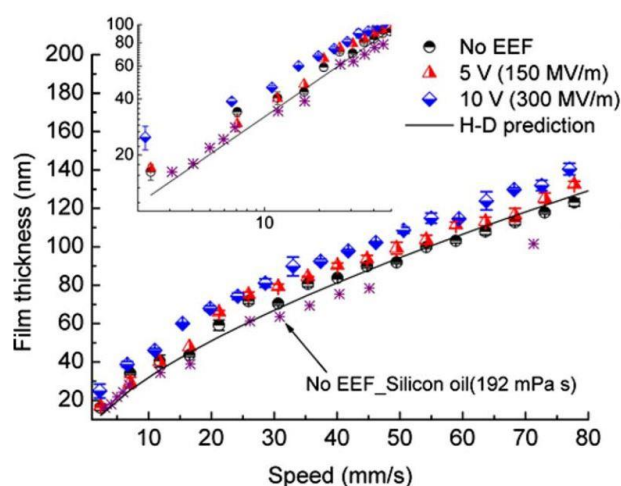


Obr. 2-23 Závislosť zmeny drsnosti na napájacom napätí [61]

2.2.3 Vplyv elektrického poľa na hrúbku mazacieho filmu

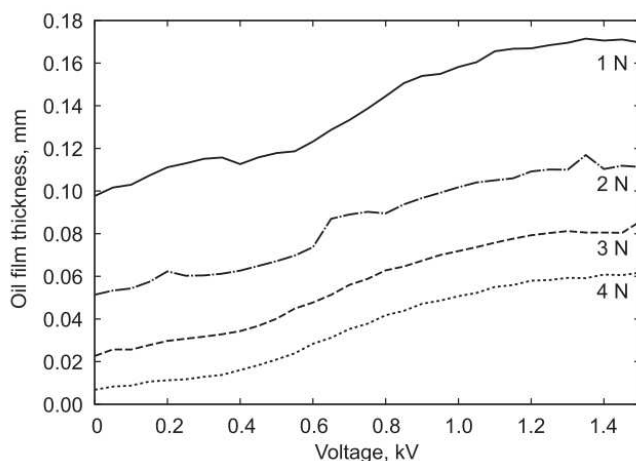
Mazanie ER kvapalín pod vplyvom elektrického poľa púta pozornosť kvôli veľkému potenciálu využitia, a to najmä v oblasti mazania tenkými filmami. Pridaním elektrického poľa dochádza k zmene vlastností v ER kvapaline, čím je ovplyvnená aj mazacia vrstva ER kvapaliny, pričom sú problematické hlavne mechanizmy vystavované elektrickému napätiu. V minulosti vznikli viaceré štúdie, ktoré sa venovali tejto problematike. Luo a kol. [56] sa zaoberal pozorovaním mazacej vrstvy nanokvapaliny v prítomnosti elektrického poľa. Testované boli nanokvapaliny tvorené základovým olejom a kyselinou olejovou, resp. kyselinou laurovou. Výsledky naznačujú, že hrúbka mazacej vrstvy je úzko spätá s napätím externého elektrického poľa. Takéto správanie vykazovali aj iónové kvapaliny počas experimentu podľa Xia a kol. [62]. Na základe výsledkov zhodnotil, že pri nižších rýchlostiach môže dochádzať v blízkosti zelektrozovaných povrchov k navýšeniu štruktúrovanej iónovej vrstvy, ktorá zapríčiňuje tvorbu hrubšieho mazacieho filmu z dôvodu vyššej viskozity. Už pri hodnote napätia 5 V bol v prípade iónovej kvapaliny 1-butyl-3-methylimidazolium hexafluorofosfát ($[BMIm]PF_6$) zaznamenaný nárast mazacej vrstvy v jednotkách nm. Navýšením napätia na 10 V došlo ešte k výraznejšej zmene,

ako je zobrazené na obr. 2-24, pričom výsledky spomínanej iónovej kvapaliny sú zrovnávané so silikónovým olejom a predikciou podľa Hamrocka-Dowsona.



Obr. 2-24 Vplyv elektrického poľa na hrúbku mazacieho filmu [62]

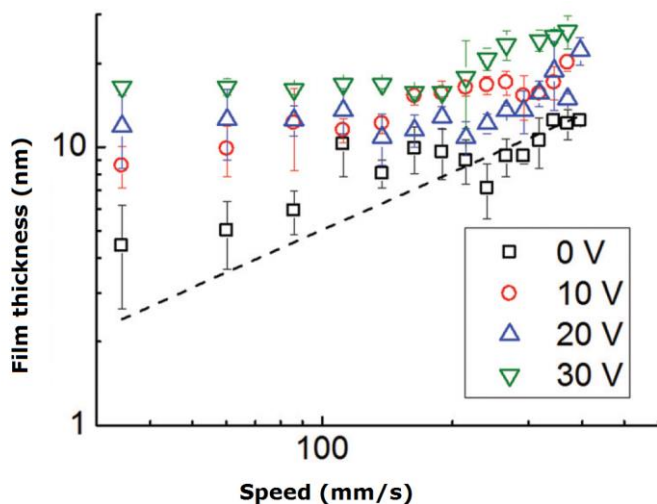
Ďalšia štúdia bola zameraná na skúmanie tlmiacich vlastností tekutého kryštálu použitého ako mazivo v klznom ložisku [63]. Experimentálne zariadenie pozostávalo z bloku pritláčaného na rotujúci disk so zaťažením 1 – 4 N. Hrúbka mazacej vrstvy bola vyhodnocovaná pomocou štyroch senzorov vzdialenosti s vysokou presnosťou fungujúcich na princípe vírivých prúdov. Viskozita tekutého kryštálu sa zväčšovala s narastajúcim elektrickým poľom. Počas experimentov bol zaznamenaný nárast hrúbky mazacej vrstvy, avšak za prítomnosti relatívne vysokých napätí až 1,5 kV.



Obr. 2-25 Závislosť hrúbky mazacieho filmu na napätí tekutého kryštálu [63]

V roku 2011 vznikla experimentálna štúdia zaoberajúca účinkom vzájomného pôsobenia molekúl maziva na tvorbu mazacej vrstvy po aktivácii externého elektrického poľa v bodovom kontakte [64]. Mazanie kontaktu bolo realizované zmesou *n*-alkánov a *n*-alkoholov, a to z dôvodu lepšej odozvy na pôsobenie elektrického poľa ako v prípade,

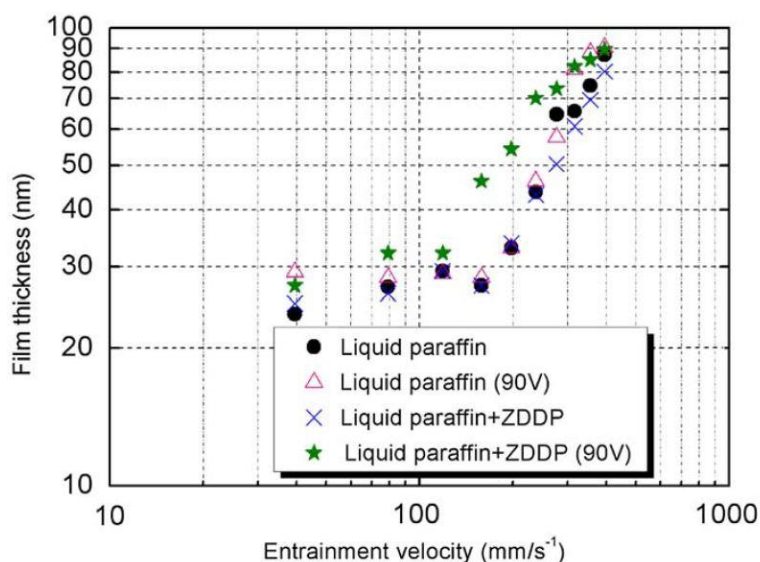
kedy boli aplikované samostatne [65]. Testované boli rôzne pomery týchto kvapalín, pričom najvýraznejší vplyv elektrického poľa nastával u zmesi *n*-decanolu a *n*-heptánu v pomere 1:4. Výsledky z experimentu boli vykreslené do závislosti na obr. 2-26 a zrovnávané s elastohydrodynamickou (EHD) teóriou mazania, reprezentovanou čiarkovanou čiarou. Z grafu je zrejmé, že pôsobením externého elektrického poľa dochádza k nárastu hrúbky filmu maziva, čo potvrdzuje výsledky experimentu podľa Lua a kol. [56].



Obr. 2-26 Vplyv elektrického poľa na hrúbku mazacieho filmu [64]

Ovplyvnenie mazacej vrstvy pôsobením elektrického poľa sa vyskytuje aj v reálnych aplikáciách súčastí, ktoré sú vystavované výbojom elektriny, príp. u ktorých dochádza k prenosu elektrického náboja od elektrických zariadení mechanizmu. Vo väčšine prípadov ide o ložiská ku ktorým je privádzaný elektrický náboj prostredníctvom uloženia alebo hriadele. Pre objasnenie týchto mechanizmov vznikla v minulosti experimentálna práca zaoberajúca sa problematikou kavitácie pri pôsobení elektrického poľa [66]. Prostredníctvom „ball-on-disk“ zariadenia bol pozorovaný vplyv elektrického poľa na tvorbu bublín glycerínu. Pridaním externého elektrického poľa dochádzalo k tvorbe bublín, čo bolo odôvodnené ako dôsledok vibrácie mazacej kvapaliny spôsobené elektrickou silou. Tieto bubliny mali tendenciu pohybovať sa v radiálnom smere centrálnej oblasti, čo malo za následok pokles tlaku.

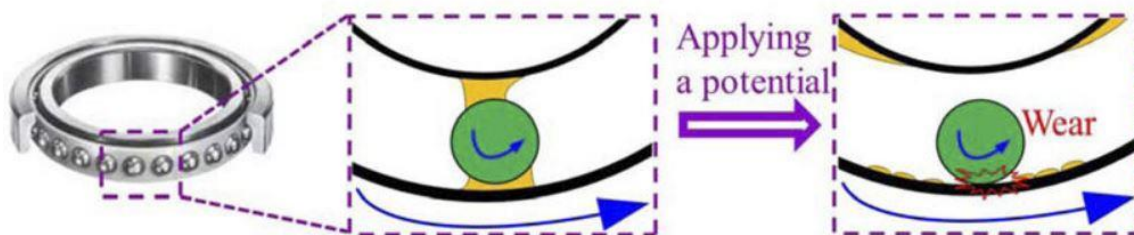
Podobnou problematikou sa zaoberal Xie a kol. [67], ktorý pozoroval správanie mazacej vrstvy a vplyv elektrického poľa na tvorbu mikro bublín tekutého parafínu s použitím aditíva zinc dialkyldithiophosphate (ZDDP). Experimenty boli vykonávané na „ball-on-disk“ tribometre. Intenzita vzniku mikro bublín sa pridaním aditíva ZDDP nepatrne zvýšila. Pôsobením elektrického poľa došlo k zmene schopnosti molekúl preskupovať sa, čo malo za následok zmeny v hrúbke mazacieho filmu. Prítomnosťou aditíva ZDDP bol zaznamenaný mierny nárast mazacej vrstvy tekutého parafínu pri pôsobení externého elektrického poľa o veľkosti 90 V (obr. 2-27).



Obr. 2-27 Mazacia vrstva parafínu s aditívom pri pôsobení elektrického poľa [67]

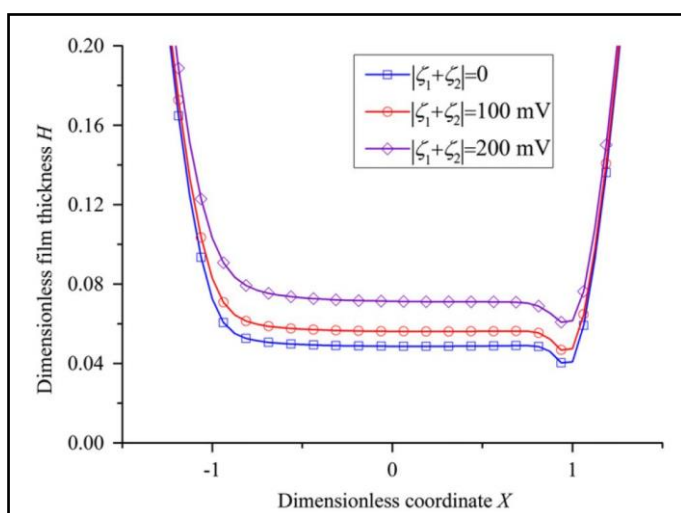
Na svoju predchádzajúcu štúdiu nadviazal neskôr Xie a kol. [68], kde pozoroval vlastnosti tenkého mazacieho filmu glycerínu v nabitom mazanom kontakte s ohľadom na tvorbu mikro bublín. Výsledky experimentov ukazujú, že tvorba mikro-bublín v nanoškále je úzko spätá s tokom elektrického prúdu. Bubliny vytvorené negatívnou polaritou externého elektrického poľa môžu dokonca vytrvať až po dobu 120 min takmer bez zmeny veľkosti a tvaru. Po odstránení elektrického poľa dochádzalo k vážnemu poškodeniu povrchov elektro-chemickým vplyvom práve v prípade negatívnej polaroty externého elektrického poľa. Na druhej strane, bubliny vytvorené pozitívnou polaritou elektrického poľa zanikajú vo veľmi krátkom čase, čo môže byť potenciálnou príčinou výskytu kavitačnej erózie u ložísk.

V súvislosti s mazaním ložísk vznikla experimentálna práca zameraná na hladovanie maziva v kontaktnej oblasti s cieľom objasniť mechanizmy zlyhania ložísk, ktoré sú vystavované pôsobeniu elektrického poľa [69]. Obnovovanie mazacej vrstvy prebieha za pomoci kapilárneho javu. Problém nastáva v okamžiku, kedy je do systému privedený elektrický potenciál ktorý má destabilizačné účinky a dochádza k odvádzaniu maziva z kontaktnej oblasti, ako je schematicky zobrazené na obr. 2-28. Experimenty prebiehali na zariadení „ball-on-disk“, pričom boli použité mazivá *n*-hexadekanol a parafinový olej. Zo zistení plynie, že prítomnosťou elektrického poľa je mazivo vyťahované z kontaktnej oblasti, čo môže mať za následok poškodenie povrchov z dôvodu hladovania maziva v kontakte.



Obr. 2-28 Negatívny vplyv elektrického potenciálu na mazaciu vrstvu v ložiskách [69]

Okrem experimentálnych štúdií vznikli aj teoretické štúdie zaoberajúce sa problematikou tenkých mazacích filmov v prítomnosti externého elektrického poľa [70, 71]. Zuo a kol. [72] aplikoval matematický model s dvojistou elektrickou vrstvou, kde sa zaoberal hydrodynamickým a EHD mazaním. Na základe výsledkov výpočtového modelu bolo konštatované, že prítomnosťou elektrickej vrstvy dochádza počas EHD režimu mazania k nárastu hrúbky mazacieho filmu pri minimálnej zmene tlaku v kontakte. Na obr. 2-29 je zobrazený vplyv veľkosti potenciálov na distribúciu mazacej vrstvy v bodovom kontakte EHD režimu mazania, kde ζ_1 a ζ_2 sú elektrické potenciály hornej a dolnej elektrickej vrstvy.



Obr. 2-29 Vplyv elektrického poľa na hrúbku mazacieho filmu [72]

Ďalšia štúdia, ktorá sa zaoberala dynamickým správaním klzného ložiska s nenatívnou ER kvapalinou založenou na Reynoldsovej rovnici. Prostredníctvom zmeny intenzity elektrického poľa bol overený vplyv budenia na tlmiace vlastnosti ložiska, resp. ER kvapaliny vo vnútri [73]. Takéto modely je po experimentálnom overení možné aplikovať do CFD analýzy a znížiť tak náklady na vývoj nových zariadení. Experimentálnym overením magnetického modelu sa zaoberala štúdia [74], kde bola dosiahnutá dobrá zhoda medzi testami s ER kvapalinou v klznom ložisku a prezentovaným matematickým modelom.

2.2.4 Zhrnutie experimentálnych meraní ER kvapalín

Rovnako ako v prípade magnetických kvapalín boli vybrané najvýznamnejšie experimentálne štúdie elektroeologických kvapalín s budením elektrickým poľom a sú uvedené v tab. 2-2 spolu s vybranými vlastnosťami a zaťažovacími podmienkami. Vzhľadom k tomu, že na viaceré ER kvapaliny boli aplikované aj optické metódy meraní, je v tabuľke uvedený aj index lomu.

Tab. 2-2 Zhrnutie vybraných experimentov ER kvapalín

Autor	Vzorka	Index lomu [-]	Viskozita 25 °C [mPa·s]	Experimentálne zariadenie	Zaťažovacie podmienky	Dosiahnuté výsledky
Xie a kol. 2010 [67]	Tekutý parafín + 5 hm. % ZDDP	1,471	30,12	ball-on-disc tribometer	0 – 90 V 27 N (191 MPa)	Mierny nárast hrúbky mazacieho filmu pri napätí 90 V
Xie a kol. 2010 [62]	Iónové kvapaliny [BMIm]PF ₆ [HMIm]PF ₆ [OMIm]PF ₆	1,410	210 410 690	ball-on-disc tribometer	0 – 20 V (0 – 960 MV·m ⁻¹) 530 MPa	Nárast hrúbky mazacej vrstvy o 16 nm pri externom napätí 10 V
Xie a kol. 2011 [64]	Roztok 1:4 <i>n</i> -dekanol/ <i>n</i> -heptán	1,430	1.85	ball-on-disc tribometer	0 – 30 V 28 N	Nárast hrúbky mazacej vrstvy o 10 nm pri externom napätí 30 V
Matsumura a kol. 2012 [63]	Tekutý kryštál	-	28 (20 °C)	Ložiskový blok s elektrodami	0 – 1500 V 1 – 4 N	Nárast hrúbky filmu a zdanlivej viskozity
Kong a kol. 2016 [58]	Iónové kvapaliny [C ₂ MIM][BF ₄] [C ₄ MIM][BF ₄] [C ₆ MIM][BF ₄]	-	41 98 300	ball-on-disc recipročný tribometer	0 – 10 V 0,1 – 1 N (210 – 454 MPa)	Takmer dvojnásobný nárast súčiniteľa trenia

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE

3.1 Analýza problému

Pre výskum smart mazív s cieľom skúmania tribologického správania v inteligentných ložiskách je nutné v prvom rade zvoliť vhodnú vzorku, resp. smart kvapalinu, ktorá by spĺňala určité kritéria vhodnosti pre danú aplikáciu, ide o faktory: vysoká životnosť spojená s nízkym opotrebením kontaktných povrchov, dobré mazacie vlastnosti, a možnosť externe riadiť správanie maziva. Na základe poznatkov získaných z rešeršnej časti je možné klasifikovať smart kvapaliny podľa typu budenia na dve základné skupiny, teda MR a ER kvapaliny.

V prípade MR kvapalín je možné doceliť navýšenie viskozity a zabránenie vytekaniu z okolia kontaktnej oblasti pomocou pôsobiaceho magnetického poľa. Častice rozptýlené v MR kvapaline formujú reťazce podľa siločiar magnetického poľa, čím spôsobujú nárast odporu proti tečeniu, vďaka čomu už našli MR kvapaliny svoje uplatnenie v aktívnych tlmičoch odpruženia vozidiel (MR tlmiče) a mnohých ďalších aplikáciách [75]. Aby bolo možné aplikovať MR kvapaliny vo vysoko zaťažených súčiastkach, ako napr. ložiská, je potrebné v konštrukcii zahrnúť magnet pre budenie magnetického poľa s dostatočnou intenzitou. Najväčším problémom pri aplikácii MR kvapalín sú práve častice rozptýlené v nosnom médiu, ktoré v závislosti na veľkosti a tvare magnetických častíc zapríčiňujú navýšenie trenia a najmä zvýšené riziko opotrebenia [30]. Aj napriek tomu, že komparatívna štúdia [25] naznačuje, že aktiváciou magnetického poľa dochádza k zmenšeniu rozsahu opotrebenia, rozptýlené častice spôsobujú výrazný abrazívny charakter opotrebenia. Niektoré práce ukazujú, že v prítomnosti magnetického poľa je možné dosiahnuť nižší súčiniteľ trenia magnetickej suspenzie, ako u nosného média, a to v prípade poddajných kontaktov, textúrovaných povrchov a nižších zaťažení [38]. V prípade vysokých zaťažení nastáva problém so vstupom magnetických častíc do kontaktnej oblasti. V porovnaní s hrúbkou mazacej vrstvy valivých elementov ložísk, ktorá sa pohybuje rádovo v jednotkách nm, sú aj častice ferrokvapalín, pohybujúce sa v stovkách nm pomerne veľké, čo môže mať za príčinu obtekanie častíc okolo kontaktnej oblasti.

ER kvapaliny môžu byť podobne ako v prípade MR kvapalín tvorené formou suspenzií, alebo existujú kvapaliny, ktoré prirodzene vykazujú ER fenomén v blízkosti elektrického poľa. Prirodzené ER kvapaliny je taktiež možné zmiešať s nosným médiom alebo olejom, čím vznikne emulzia ER kvapaliny. Aplikáciou prirodzených ER kvapalín, alebo ER emulzií vykazujúcich odozvu na prítomnosť elektrického poľa je možné sa obtekaniam častíc vyhnúť a naskytuje sa možnosť dosiahnuť veľmi tenké mazacie filmy vysoko zaťažených kontaktov, u ktorých je stále možné vyvolať ER efekt. Najväčším

problémom v prípade ER kvapalín je veľkosť budiaceho napätia, ktoré vyvolá pozorovateľné zmeny v správaní kvapaliny. Na vyvolanie ER efektu je potrebné priviesť napätie na kontaktnú dvojicu, medzi ktorou sa utvára mazací film. Vo väčšine prípadov ER kvapalín bolo potrebné vytvoriť relatívne vysokú elektrickú intenzitu, a to v desiatkach, až stovkách $\text{MV}\cdot\text{m}^{-1}$ [63]. Vzhľadom k tomu, že sa hrúbka mazacieho filmu tenkých mazacích filmov pohybuje v desiatkach nanometrov, stačí pre dosiahnutie pomerne vysokej intenzity elektrického poľa približne $100 \text{ MV}\cdot\text{m}^{-1}$, externé napätie rádovo v jednotkách V, čo je jednoducho dosiahnuteľné laboratórnymi zdrojmi. V mnohých experimentálnych prácach boli aplikované iónové kvapaliny. Budením dochádzalo podľa niektorých zistení k prichytávaniu nabitých častíc k povrchom kontaktných dvojíc a tvorbe aniónových a kationových reťazcov, čo bolo považované za príčinu nárastu hodnoty súčiniteľa trenia [58]. Trecie testy s iónovými kvapalinami naznačujú, že je možné meniť súčiniteľ trenia skokovo [59], avšak počas experimentov nebola sledovaná teplota, ktorá má výrazný vplyv na reologické vlastnosti a správanie maziva. Niektoré experimenty ukazujú, že je takýmto spôsobom možné navýšiť aj hrúbku mazacej vrstvy za použitia iónových kvapalín [62]. Pri aktivácii elektrického poľa je potrebné dbať aj na orientáciu polaritu, dôsledkom čoho sa môžu objavovať rozličné mechanizmy tvorby bublín a formovania reťazcov v iónovej kvapaline [68]. V prípade iónových kvapalín nebolo doposiaľ skúmané hysterézne správanie pri opätovnom budení, čo má veľký význam z hľadiska trvanlivosti a pre overenie prípadnej degradácie iónových kvapalín v prítomnosti elektrického poľa.

Vzhľadom k tomu, že prítomnosť magnetických častíc by mohla v prípade aplikácie v ložiskách pôsobiť ako iniciátor opotrebenia a taktiež by pri vysokom zaťažení mohlo dochádzať k otekaniu kontaktnej oblasti, sa ER kvapaliny javia ako vhodnejšie smart mazivá do inteligentných ložísk. A to aj vďaka tomu, že bola zaznamenaná zmena v hrúbke mazacej vrstvy po aktivácii elektrického poľa. U ER kvapalín je potrebné relatívne vysoké budiace napätie, avšak použitím nekonformnej kontaktnej dvojice, u ktorej je kontaktná oblasť veľmi malá, postačí na budenie laboratórny zdroj. Po uvážení všetkých spomínaných faktov sa pre experimenty javí ako najvhodnejšia práve iónová kvapalina.

Aby bolo možné stanoviť citlivosť iónovej kvapaliny na prítomnosť elektrického poľa, musí byť zvolená vhodná pozorovacia metóda. Správanie kvapky iónovej kvapaliny počas budenia môže byť použitím vhodného prípravku pozorovaná optickým mikroskopom. Pre vyhodnotenie hrúbky mazacej vrstvy je potrebné zvoliť vhodnú metódu umožňujúcu pozorovanie kontaktnej oblasti a zavedenie elektrického obvodu. Aby bolo možné preniesť budiace napätie do kontaktnej oblasti bude nutné upraviť súčasnú aparatúru optického tribometru pre privedenie budiaceho obvodu a odizolovať ju pre zamedzenie prípadných napätových strát. Ďalej je potrebné navrhnúť spôsob vyhodnocovania trenia s ohľadom na opakovateľnosť vykonávaných meraní, aby sa zamedzilo výskytu náhodných javov. Požadovaný režim mazania počas budenia pri trecích testoch je EHD, kedy sú povrchy úplne oddelené a nedochádza k interakciám nerovností ako to bolo v štúdií [59], kedy sa pri budení vyskytovali pomerne vysoké elektrické prúdy, až 4 A. Vzhľadom k tomu, že zmeny

správania zvolenej smart kvapaliny v počas budenia môžu byť veľmi malé, je potrebné voliť tribometer s vyššou citlivosťou senzorov. Počas trecích testov bude zaznamenávaná teplota, ktorá hrá významnú rolu v zmene reologických vlastností kvapalín. Po trecích testoch bude zisťovaný vplyv prítomnosti aktívneho externého poľa na opotrebenie kontaktnej dvojice.

3.2 Cieľ práce

Hlavným cieľom tejto práce je stanovenie vplyvu elektrického poľa na trecie charakteristiky nekonformného kontaktu mazaného iónovou kvapalinou. Ide o výskumnú prácu zameranú na štúdium správania zvolenej smart kvapaliny pre inteligentné ložiská, ktorej reologické vlastnosti by bolo možné plynule regulovať.

Čiastkové ciele:

- spracovanie bibliografickej rešerše
- voľba vzorky pre merania
- návrh experimentálneho prístupu a parametrov meraní
- modifikácia súčasných experimentálnych zariadení
- overenie odozvy iónovej kvapaliny na budenie elektrickým poľom
- experimentálne stanovenie vplyvu elektrického poľa na hrúbku mazacieho filmu
- experimentálne stanovenie vplyvu elektrického poľa na trenie a opotrebenie

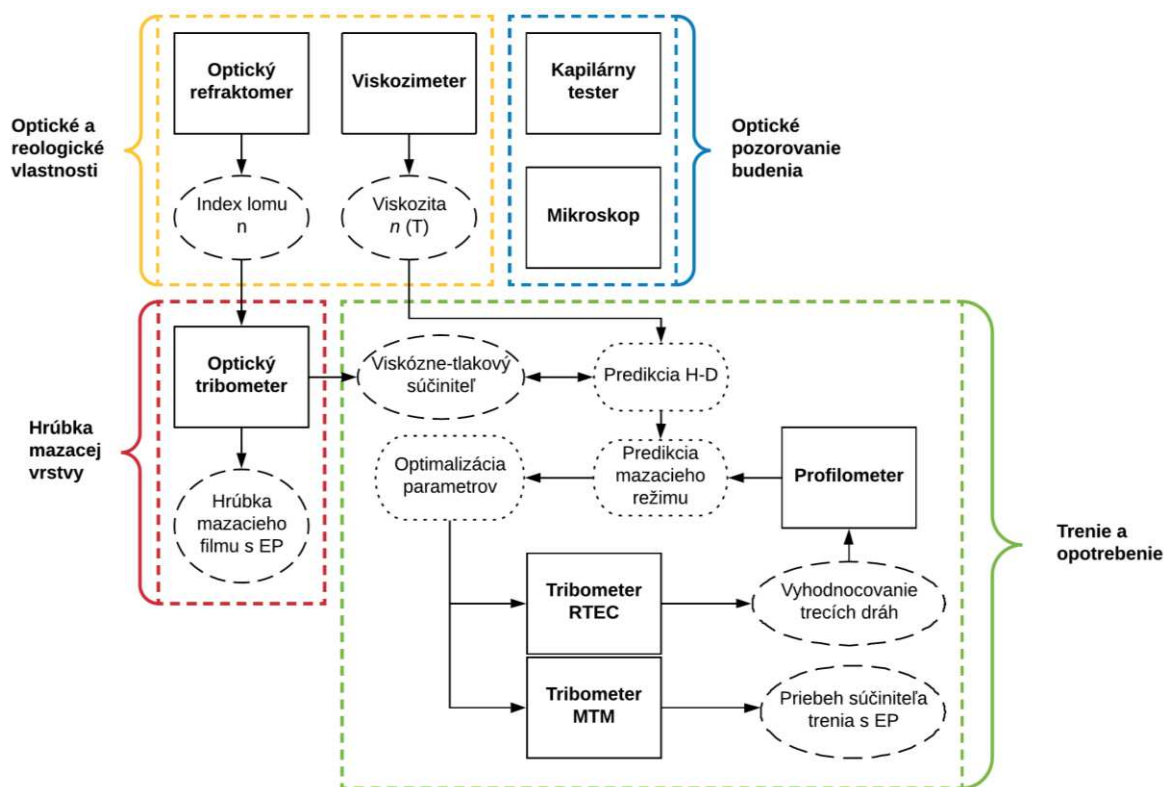
Požadované výstupy:

- sprievodná správa
- výkresy súčastí
- digitálne dáta
- publikačný výsledok (J_{SC})

4 MATERIÁL A METÓDY

4.1 Metodika diplomovej práce

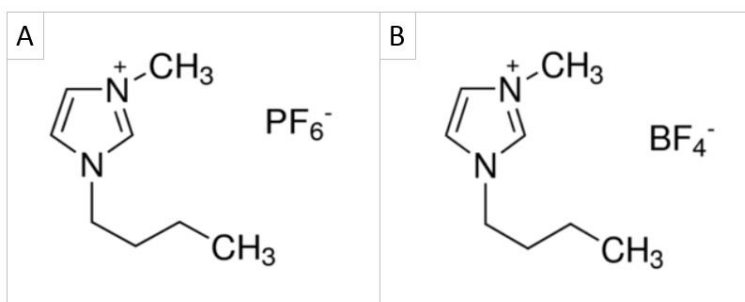
Na obr. 4-1 je schematicky zobrazená použitá metodika experimentálnych meraní diplomovej práce. Pre komplexný popis správania zvolených iónových kvapalín bolo potrebné vykonať merania optických a reologických vlastností, ako vstupné parametre ďalších meraní. Aby bolo možné overiť odozvu zvolených vzoriek na elektrické pole (EP) bola budenie vzorky realizovaná pod mikroskopom a s použitím kapilárneho testeru na budiacom obvode. Prostredníctvom optického tribometru bol stanovovaný viskózne-tlakový súčiniteľ pre predikciu mazacích režimov a stanovenie parametrov trecích testov pre dosiahnutie a identifikáciu požadovaného EHD režimu mazania. Následne bola aj meraná hrúbka mazacej vrstvy v prítomnosti EP. Ďalej bolo skúmané trenie pomocou tribometru Mini Traction Machine a opotrebenie po trecích testoch na zariadení RTEC s a bez prítomnosti EP prostredníctvom profilometru Bruker Contour GT-X. Všetky merania a zariadenia sú popísané v nasledujúcich kapitolách.



Obr. 4-1 Schéma postupu experimentálnych meraní

4.2 Experimentálne kvapaliny

Pre štúdium smart kvapalín bol zvolený prirodzený typ ER kvapalín – iónové kvapaliny. Iónové kvapaliny sú soli v tekutom stave, ktoré sú tvorené aniónmi a kationmi. Na základe rešerše iónových kvapalín reagujúcich na prítomnosť elektrického poľa sa javí ako najvhodnejšia 1-Butyl-3-metylimidazolium hexafluorofosfát ($[\text{BMIM}]^+[\text{PF}_6]^-$), ďalej len PF_6 (obr. 4-2 A). Použitím tejto kvapaliny boli pozorované zmeny v hrúbke mazacieho filmu [62] a zmeny v hodnotách súčiniteľa trenia. Na základe poznatkov z rešerše bola zvolená ešte jedna iónová kvapalina 1-Butyl-3-metylimidazolium tetrafluoroborát ($[\text{BMIM}]^+[\text{BF}_4]^-$), ďalej len BF_4 (obr. 4-2 B), u ktorej boli zaznamenané zmeny v hodnotách súčiniteľa trenia vplyvom elektrického poľa [58].



Obr. 4-2 Chemická štruktúra iónových kvapalín A) $[\text{BMIM}]\text{PF}_6$ B) $[\text{BMIM}]\text{BF}_4$

Na obr. 4-3 sú zobrazené zakúpené certifikované iónové kvapaliny s min. čistotou 98 % od spoločnosti Sigma-Aldrich. Obe kvapaliny sú transparentné, a preto je možné aplikovať optické metódy meraní, ktoré vyžadujú priehľadné kvapaliny, ako napr. optická interferometria [76]. Cena iónových kvapalín je pomerne vysoká – 15 000 Kč/100 ml PF_6 a 5 500 Kč/100 ml BF_4 . Vzhľadom k relatívne vysokej cene kvapalín bolo pre experimenty zakúpené iba malé množstvo – približne 35 ml PF_6 a 80 ml BF_4 .



Obr. 4-3 Iónové kvapaliny pre experimenty

Zvolené iónové kvapaliny majú číry vzhľad a ich hustota s dynamickou viskozitou pri izbovej teplote z experimentálnej práce [77] sú uvedené v tab. 4-1. Okrem iónových kvapalín bol vybraný aj minerálny olej Renolin MA68, ďalej len MA68, pre optimalizáciu meracích parametrov a experimentálnych zariadení.

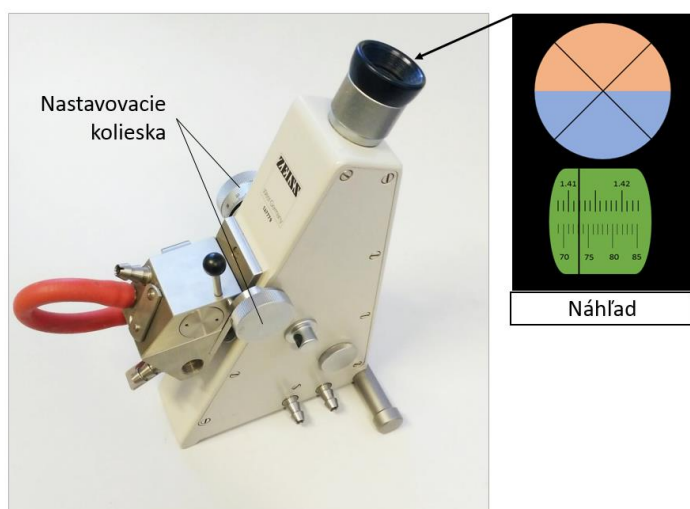
Tab. 4-1 Hustota a viskozita vzoriek pri 20 °C [77]

Vzorka	Hustota	Dynamická viskozita
	ρ [kg·m ⁻³]	η [mPa·s]
BF ₄	1205	375,9
PF ₆	1370	109,2
MA68	883 (25 °C)	-

4.3 Optické a reologické vlastnosti

Stanovenie indexu lomu

Hodnota indexu lomu je jedným zo vstupných parametrov kalibrácie optickej interferometrie. Pre získanie vstupných parametrov do meraní hrúbky mazacej vrstvy bolo potrebné získať hodnoty indexov lomu zvolených kvapalín pomocou Abbeho refraktometru (obr. 4-4).

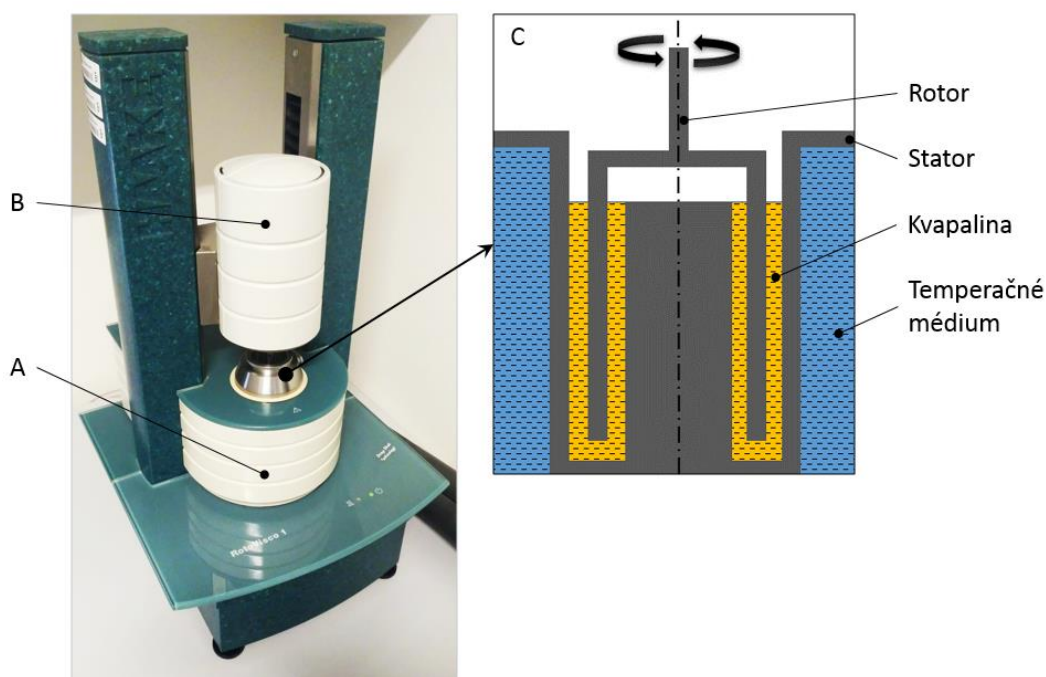


Obr. 4-4 Abbeho refraktomer

Meranie je založené na zisťovaní medzného uhla, ktorý je daný polohou rozhrania medzi osvetlenou a tmavou časťou zorného poľa, ktorá sa odčíta na stupnici prístroja. Po nanesení kvapky skúmanej tekutiny na optický hranol je možné pomocou nastavovacích koliesok zaostriť obraz rozhrania pre dosiahnutie ostrého prechodu v centre kríža. Následne je možné získať index lomu priamo zo zabudovanej stupnice prístroja.

Stanovenie viskozity

Stanovenie viskozity vzoriek bolo realizované pomocou rotačného viskozimetra Haake RotoVisco1, ktorý určuje viskozitu zo silových účinkov maziva umiestneného medzi dvomi valcovými plochami (jedna stacionárna a druhá rotujúca). Mazivo bolo umiestnené v temperovanej komore (obr. 4-5 A). Meraná bola sila potrebná na prekonanie odporu proti otáčaniu rotora, ktorý je pripevnený na hriadeli motora meracej jednotky (obr. 4-5 B). Na základe známej rýchlosti otáčania a geometrie rotora bol pomocou viskozimetra určený krútiaci moment motora a z neho viskozita kvapaliny.



Obr. 4-5 Rotačný viskozimeter RotoVisco1 so schémou dvojice Double Gap DG41

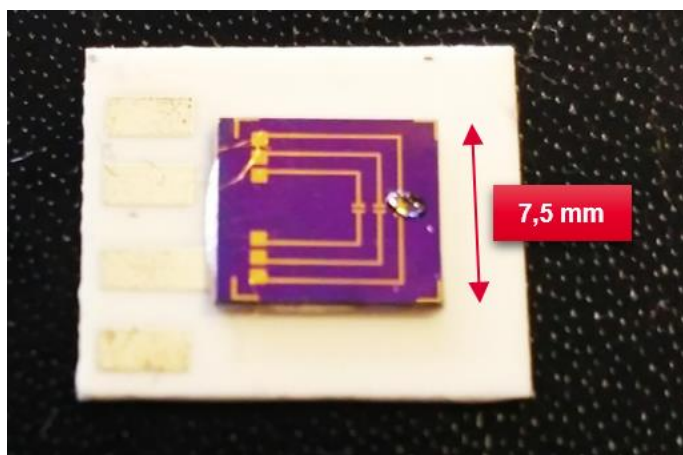
Z ekonomického hľadiska bol zvolený typ dvojice „double gap“ využívajúci najmenšie množstvo maziva potrebné pre merania, ako ostatné dostupné typy dvojíc. Pre merania s valcovým senzorom Double Gap DG41 je potrebné iba 6,3 ml kvapaliny umiestnenej medzi statorom s centrálnym valcom, ktorý vyplňa nadbytočný objem a rotorom pripevneným na hnaný hriadeľ so senzorom (obr. 4-5 C).

4.4 Optické pozorovanie budenia

Pre overenie odozvy iónovej kvapaliny na prítomnosť elektrického poľa boli realizované optické pozorovania kvapky na budiacom obvode prostredníctvom mikroskopu a kapilárneho testeru z [78], ktorý sa pôvodne používa na meranie povrchového napätia kvapky.

Stanovenie odozvy na budiacom obvode

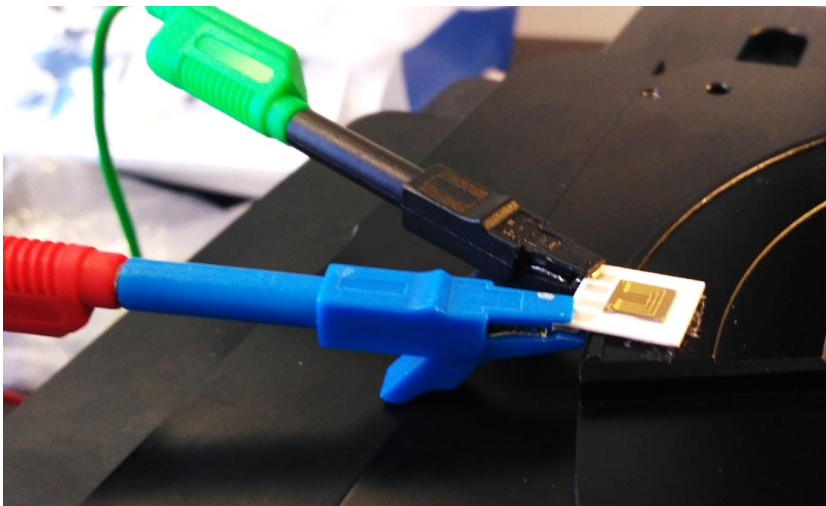
Aby bolo možné zistiť akým spôsobom vplýva elektrické pole na zvolené vzorky, resp. iónové kvapaliny, boli zaobstarané mikroobvody z kremíkovej doštičky so škárou 100 μm . Obvod bol pripojený mikrokontaktnými spojmi k pripájacím plochám umiestnených v platforme (obr. 4-6). Do oblasti s medzerou, ktorá reprezentuje elektródy bola nanesená kvapka pozorovanej vzorky. Použitím zdroja do 40 V bolo možné v 100 μm škáre vyvolať intenzitu približne až $0,4 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$ a priamo pozorovať odozvu kvapaliny.



Obr. 4-6 Kremiková doštička pre pozorovanie odozvy so vzorkou

Pozorovanie budiaceho obvodu pomocou mikroskopu

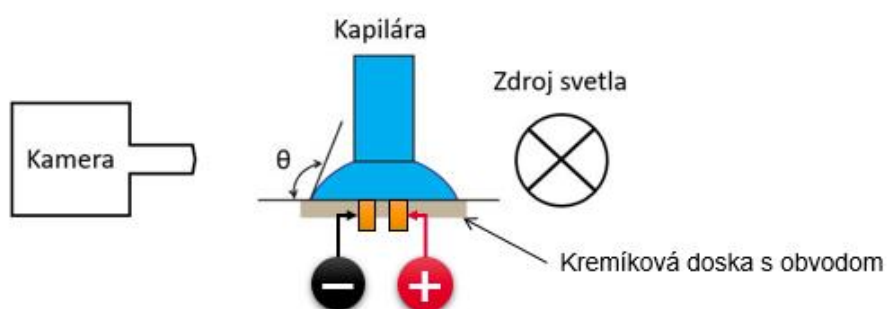
Budenie vzorky na doštičke bola pozorovaná na optickom mikroskope s objektívmi 20 – 100x pre dostatočné zaostrenie obrazu. Objektív s väčším zväčšením nebolo možné použiť, pretože dochádzalo ku kolíziám s kremíkovou doštičkou. Jednosmerné elektrické napätie bolo privádzané prostredníctvom vodičov pripojených k pripájacím plochám na platforme (obr. 4-7).



Obr. 4-7 Kremíková doštička pripevnená k stolu mikroskopu

Pozorovanie budiaceho obvodu na kapilárnom testeri

Zariadenie na meranie povrchového napätia kvapky PDM (Pendant Drop Meter) [78] bolo upravené pre možnosť budenia kvapky (obr. 4-8). Kapilára s priemerom $\varnothing 1,5$ mm bola umiestnená nad povrchom dosky tak, aby vznikla dostatočná medzera pre tvorbu kvapky, približne 1 mm nad povrchom dosky. Prostredníctvom kamery Manta G-146B ASG a telecentrického 65 mm objektívu WD Compact TL 1X boli s osvetlením za kvapkou snímané fotky pri menenom jednosmernom napätí z externého zdroja a následne bol vyhodnocovaný kontaktný uhol θ medzi doskou a kvapkou vzorky. Takto boli overené obe iónové kvapaliny a porovnávané s referenčným olejom MA68. Na snímkach boli po zachytení zvýraznené hrany v softvéri ImageJ a pomocou CAD softvéru Autodesk Inventor vyčíslený kontaktný uhol.

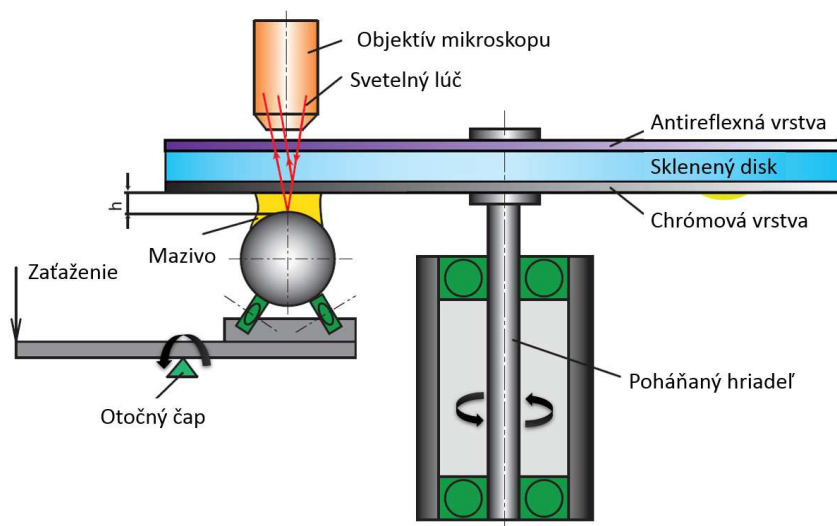


Obr. 4-8 Schéma kapilárneho testeru s budiacim obvodom

4.5 Meranie hrúbky mazacej vrstvy

Optický tribometer

Na skúmanie hrúbky mazacej vrstvy bol použitý optický tribometer. Tribometer zobrazený schematicky na obr. 4-9 je vybavený pákovým zaťažovacím mechanizmom [79]. Toto zariadenie je typu „ball-on-disk“, u ktorého dochádza ku kontaktu medzi oceľovou guľičkou a skleneným diskom so semi-reflexnou chrómovou vrstvou. Otáčky motora sú riadené prostredníctvom softvéru.



Obr. 4-9 Schéma ball-on-disk zariadenia s napájaním [79]

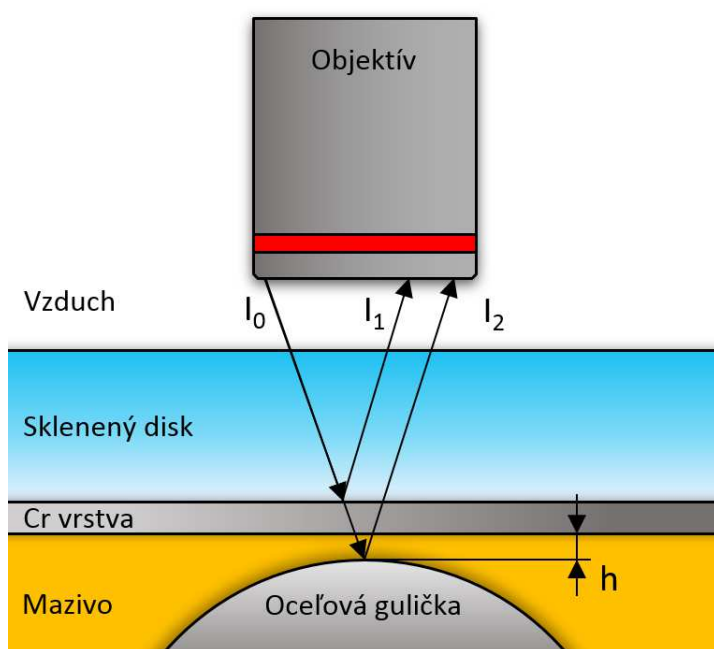
Pre zníženie drsnosti povrchu guľičky bol povrch leštený diamantovou pastou obsahujúcou 1 μm častice. Vysoké kvality kontaktnej oblasti pri leštení bolo dosiahnuté nalepením guľičky k hriadeľu, čím sa obmedzila rotácia guľičky iba na jednu os a kontaktnou oblasťou prechádzala leštená dráha. Vybrané parametre zariadenia sú uvedené v tab. 4-2.

Tab. 4-2 Vybrané parametre kontaktnej dvojice tribometru

	Gulička	Disk
Materiál	Ložisková oceľ (100Cr6)	Sklo (BK7)
Rozmer [mm]	Ø25,4	Ø150
Youngov modul [GPa]	200	80
Poissonov pomer [-]	0,3	0,2
Drsnosť R_a [nm]	12	Opticky hladký

Metóda vyhodnocovania hrúbky mazacej vrstvy

Metóda využíva sklenený disk s chrómovou vrstvou a oceľovú guľičku s odrážajúcim povrchom (obr. 4-10). Osvetlením kontaktu sa lúč svetla delí na časť, ktorá sa odrazí od semi-reflexnej chrómovej vrstvy a vracia sa do objektívu a druhá časť, ktorá sa odrazí až od povrchu guľičky, čím vzniká interferencia spôsobená posunutím fázy oboch častí odrazených lúčov, ktoré prešli rôznu vzdialenosť. Bodový kontakt je analyzovaný v softvéri Achilles pomocou kolorimetrickej interferometrie. Na základe porovnania interferenčných farieb je možné po kalibrácii priradiť hrúbku mazacej vrstvy. V porovnaní s konvenčnou interferometriou, pri ktorej je rozsah farieb vyhodnocovaný ľudským okom, sú dáta získané kolorimetrickou interferometriou vyhodnocované pomocou softvéru. Rozlíšiteľnosť tejto metódy je 1 nm, takže je možné vyhodnocovať aj veľmi tenké mazacie filmy [76]. Pre kalibráciu bol použitý červený filter s vlnovou dĺžkou 633 nm.

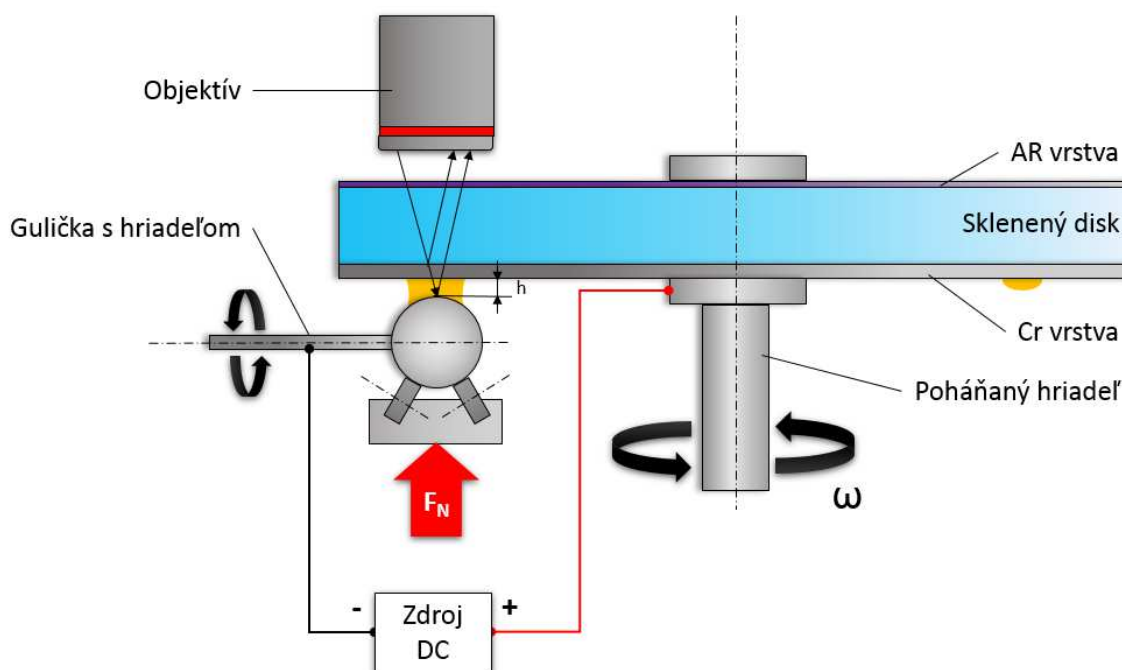


Obr. 4-10 Schéma princípu optickej interferometrie

4.5.1 Budiaci obvod

Budenie kontaktnej oblasti elektrickým poľom je realizované privedením napätia na guľičku a na osadenie hnaného hriadeľa, ktorý je v priamom kontakte s chrómovou vrstvou pre zamedzenie poškodenia chrómovej vrstvy (obr. 4-11). Prípadné napäťové straty boli zamedzené pridaním izolačného segmentu vyrobeného pomocou 3D tlače z elektricky nevodivého materiálu PLA, ktorým sa odizolovala guľička od konštrukcie tribometru, čím vznikol otvorený elektrický obvod uzatváraný kontaktom guľičky a disku, resp. mazacím filmom medzi guľičkou a diskom. Na základe poznatkov z experimentálnej práce [62], by mala chrómová vrstva preniesť dostatočne veľké napätie

potrebné na budenie kontaktnej oblasti. Pre experimenty je použitý stabilizovaný usmernený laboratórny zdroj napätia s rozsahom 0 – 30 V.



Obr. 4-11 Schéma optického tribometru s elektrickým obvodom

4.6 Výpočet predikcie režimu mazania

Vzhľadom k tomu, že cieľom práce bolo skúmanie nekonformných kontaktov, všetky použité zariadenia boli typu „ball-on-disc“. Aplikované zaťaženie zariadení bolo prepočítavané podľa vzťahu kontaktnej mechaniky telies z Hertzovej teórie [80] na maximálny kontaktný tlak p_{max} pre sférický kontakt:

Polomer sférického kontaktu a_H [mm]:

$$a_H = \sqrt[3]{\frac{3F \left[\frac{1 - \nu_A^2}{E_A} + \frac{1 - \nu_B^2}{E_B} \right]}{\frac{1}{d_A} + \frac{1}{d_B}}} \quad (4.1)$$

kde: F_N [N] je normálová prítláčná sila,
 ν_A [-] je Poissonov pomer telesa A,
 ν_B [-] je Poissonov pomer telesa B,
 E_A [Pa] je modul pružnosti telesa A,

E_B [Pa] je modul pružnosti telesa B,

d_A [mm] je priemer telesa A,

d_B [mm] je priemer telesa B, ktorý je v prípade rovinného telesa rovný ∞ .

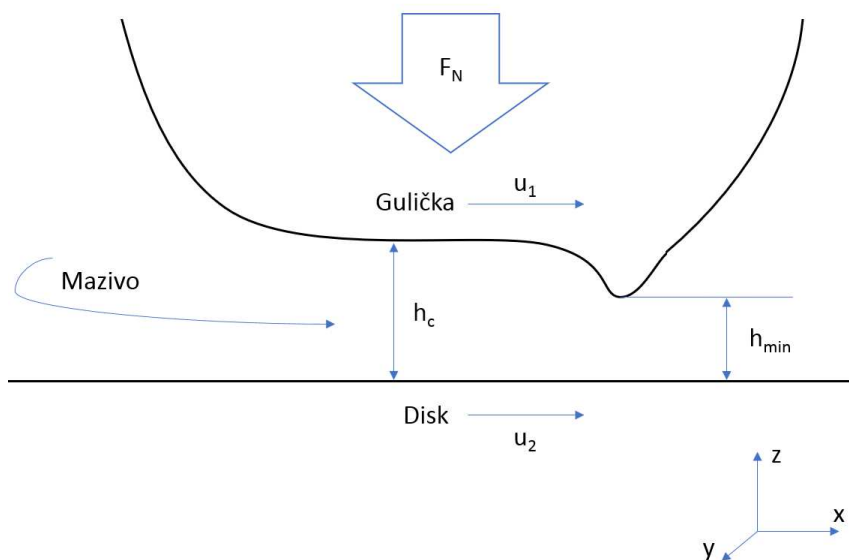
Maximálny Hertzov tlak p_{max} [MPa]:

$$P_{max} = \frac{3F_H}{2\pi a^2} \quad (4.2)$$

Stanovenie parametrov meraní a identifikácia režimov mazania bolo vyjadrené z predikcie centrálnej a minimálnej hrúbky mazacieho filmu bodového kontaktu podľa Hamrock-Dowsna [81]. Z tejto závislosti bolo potrebné vyjadriť viskózne-tlakový súčiniteľ pre všetky zvolené vzorky, ktorý sa môže výrazne líšiť.

4.6.1 Výpočet viskózne-tlakových súčiniteľov

Viskózne-tlakový súčiniteľ zvolených vzoriek bol získaný na základe predikčného vzťahu Hamrock-Dowson [81] (4.4) pre hrúbku mazacieho filmu z meraní na optickom tribometri centrálnej hrúbky mazacieho filmu pri rôznych rýchlostiach EHD režimu. Na obr. 4-12 je schematicky zobrazený EHD kontakt s vypočítavanými veličinami [82].



Obr. 4-12 Schematické zobrazenie veličín EHD kontaktu

Bezrozmerná centrálna hrúbka mazacieho filmu (H_c):

$$H_c = \frac{h_c}{R_x} \quad (4.3)$$

kde: h_c [m] je centrálna hrúbka mazacieho filmu a

R_x [m] je polomer telesa v smere osy x .

Bezrozmernú centrálnu hrúbku mazacieho filmu je možné vyjadriť aj pomocou vzťahu:

$$H_c = 2,69 \cdot U^{0,57} \cdot G^{0,53} \cdot W^{-0,067} \cdot (1 - 0,61 \cdot e^{-0,73 \cdot k}) \quad (4.4)$$

kde: U [-] je bezrozmerný parameter rýchlosti,

G [-] je bezrozmerný materiálový parameter,

W [-] je bezrozmerný parameter zaťaženia,

k [-] je bezrozmerný parameter elipticity:

$$k = \frac{a}{b} \quad (4.5)$$

a [m] je hlavná polos kontaktnej elipsy a

b [m] je vedľajšia polos kontaktnej elipsy.

Bezrozmerný parameter rýchlosti (U):

$$U = \frac{\eta_o \cdot u}{E' \cdot R_x} \quad (4.6)$$

kde: η_o [Pa·s] dynamická viskozita pri nulovom tlaku,

u [m·s⁻¹] je priemerná rýchlosť v smere osi x , $u = (u_1 + u_2)/2$

R_x [m] je polomer telesa v smere osi x ,

E' [Pa] je redukovaný modul pružnosti:

$$E' = \frac{2}{\left(\frac{1 - \nu_A^2}{E_A} + \frac{1 - \nu_B^2}{E_B} \right)} \quad (4.7)$$

Bezrozmerný parameter zat'azenia (W):

$$W = \frac{F}{E' \cdot R_x^2} \quad (4.8)$$

Bezrozmerný materiálový parameter (G):

$$G = E' \cdot \alpha \quad (4.9)$$

kde: α [Pa^{-1}] je viskózne-tlakový súčiniteľ maziva.

Po vyjadrení G z rovnice (4.4) vyjde tvar:

$$G = \left[\frac{H_c}{2,69 \cdot U^{0,57} \cdot W^{-0,067} \cdot (1 - 0,61 \cdot e^{-0,73 \cdot k})} \right]^{\frac{1}{0,53}} \quad (4.10)$$

a z bezrozmerného materiálového parametru G je ďalej možné vyjadriť **viskózne-tlakový súčiniteľ α** [Pa^{-1}]:

$$\alpha = \frac{G}{E'} \quad (4.11)$$

Po vyčíslení viskózne-tlakového súčiniteľa α je možné prepočítať minimálnu hrúbku mazacieho filmu h_{\min} , ktorá bola použitá pre predikciu mazacieho režimu podľa zadaných parametrov na základe predikcie minimálnej hrúbky mazacieho filmu podľa Hamrock-Dowsonovho vzťahu pre h_{\min} (4.13) z **bezrozmernej minimálnej hrúbky mazacieho filmu H_{\min}** :

$$H_{\min} = 3,63 \cdot U^{0,68} \cdot G^{0,49} \cdot W^{-0,073} \cdot (1 - e^{-0,68 \cdot k}) \quad (4.12)$$

z čoho je možné vyjadriť **minimálnu hrúbku mazacieho filmu h_{\min}** [m]:

$$h_{\min} = H_{\min} \cdot R_x \quad (4.13)$$

4.6.2 Predikcia mazacieho režimu

Pomocou vypočítanej minimálnej hrúbky mazacieho filmu h_{\min} z rovnice (4.13) a nameranej priemernej aritmetickej odchýlky drsnosti kontaktných povrchov R_{a1} a R_{a2} bolo možné určiť parameter mazania λ podľa rovnice (4.14), podľa ktorého je možné približne stanoviť režim mazania na základe výpočtu **bezrozmerného parametru mazania λ** [-]:

$$\lambda = \frac{h_{min}}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}} \quad (4.14)$$

Pre identifikáciu režimu mazania z rovnice (4.14) sú orientačné hranice režimov [83]:

- $\lambda < 0,8$ - medzný režim mazania
- $0,8 < \lambda < 3$ - zmiešaný režim mazania
- $3 < \lambda < 10$ - EHD režim mazania
- $\lambda > 10$ - HD režim mazania

4.7 Trenie za prítomnosti elektrického poľa

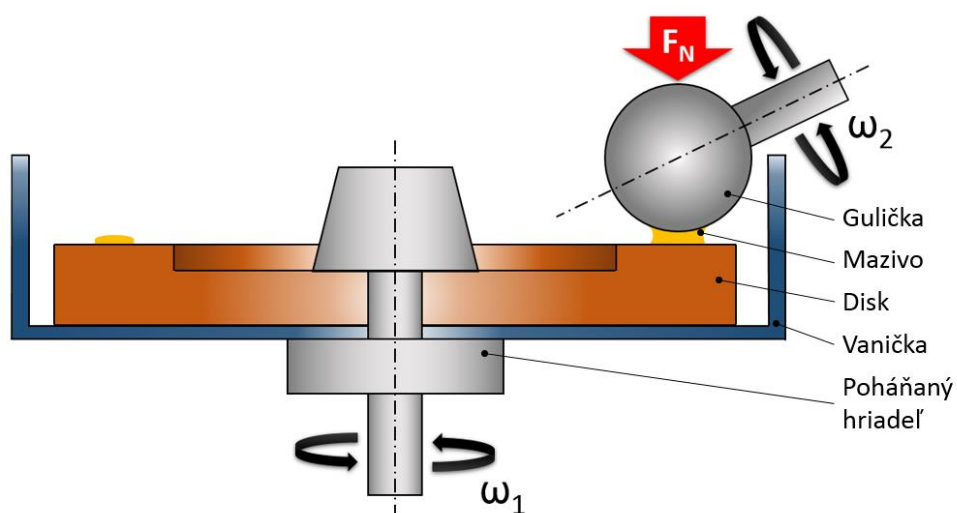
Tribometer Mini Traction Machine (MTM)

Trecie testy prebiehali na tribometri Mini Traction Machine (MTM2) v konfigurácii „ball-on-disc“ (obr. 4-13). Výhodou tohto zariadenia je nezávislá rotácia guľičky a disku, čím je možné dosiahnuť vyššie menovité rýchlosti. Pre merania s iónovými kvapalinami bol zvolený malý disk s malou vaničkou pre čo najmenšiu spotrebu kvapaliny a k nemu prislúchajúca 1/2“ guľička. Vybrané vlastnosti kontaktnej dvojice sú uvedené v tab. 4-3.

Tab. 4-3 Vybrané vlastnosti kontaktnej dvojice tribometru MTM

	Gulička	Disk
Materiál	Oceľ (C10)	Oceľ (C45)
Rozmer [mm]	Ø12.7 (1/2")	Ø32
Youngov modul [GPa]	200	200
Poissonov pomer [-]	0,3	0,3
Drsnosť R_a [nm]	15	10

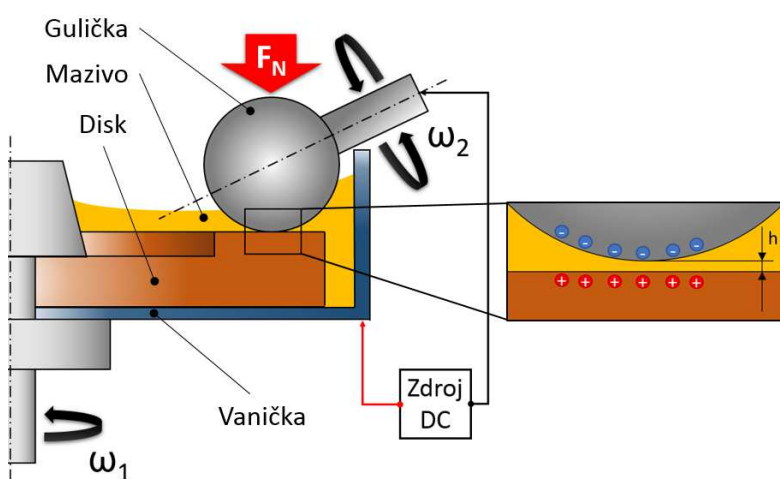
Gulička je pripevnená na hriadeli so snímačom trecej sily na šikmom ramene a pritláčaná na disk normálovou silou F_N , ktorá je regulovaná snímačom. Súčiniteľ trenia je vyhodnocovaný z nameraných dát trecej a normálovej sily. Prostredníctvom softvéru bola nastavená sekvencia meraní, ktorá ďalej prebiehala automaticky.



Obr. 4-13 Schéma kontaktnej dvojice typu „ball-on-disc“ tribometru MTM

Budiaci obvod

Pre skúmanie vplyvu elektrického poľa na trecie vlastnosti iónových kvapalín bolo potrebné vytvoriť otvorený elektrický obvod, ktorý uzatvára mazivo, resp. iónová kvapalina. Napätie bolo privádzané prostredníctvom hriadeľa guličky, a vaničky s diskom, ktoré sú elektricky vodivé (obr. 4-14). Vďaka malej vaničke stačí použiť malé množstvo maziva, približne 5 – 7 ml maziva pre plne zaplavený disk. Pri meraniach s nižšími rýchlosťami (približne do $600 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$) bolo postačujúce naniesť súvislú vrstvu maziva na povrch disku (0,2 – 0,5 ml). Experimenty s vyššími rýchlosťami si vyžadovali vyššie množstvo maziva, aby sa predišlo hladovaniu kontaktu.



Obr. 4-14 Schéma kontaktných telies tribometru MTM s elektrickým obvodom

4.8 Opatrebenie za prítomnosti elektrického poľa

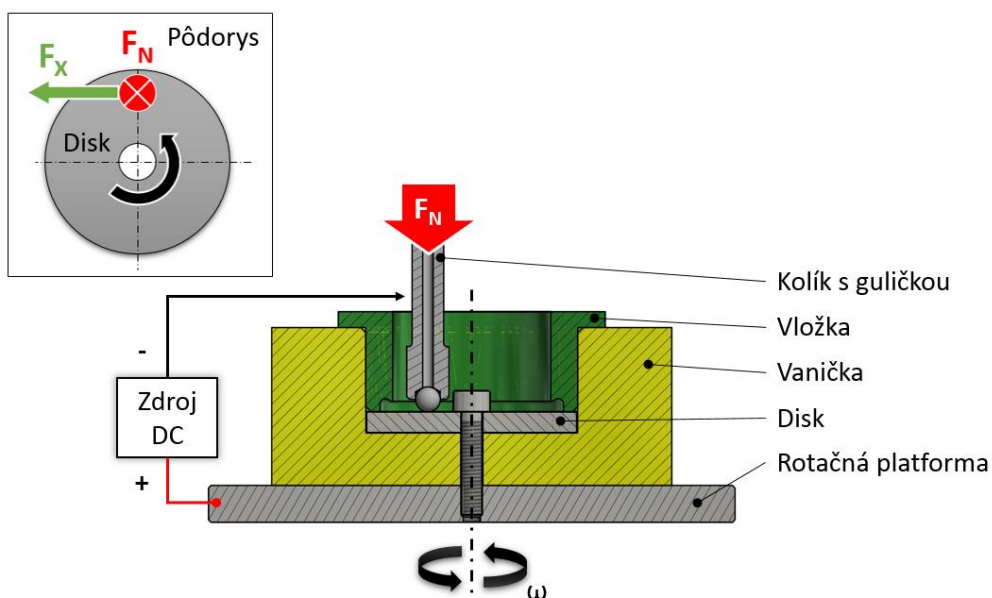
Tribometer RTEC s budiacim obvodom

Testy pre štúdium vplyvu elektrického poľa na opotrebenie prebiehali na univerzálnom tribometri RTEC s rotačným modulom typu „pin-on-disk“ s kontaktným párom guľička – disk s nekonformným kontaktom. Vybrané vlastnosti kontaktnej dvojice sú uvedené v tab. 4-4. Disk aj guľička boli leštené diamantovou pastou pre zníženie drsnosti povrchov a elimináciu výrazných nerovností, ktoré by mohli ovplyvniť vyhodnocovanie trecích dráh.

Tab. 4-4 Vybrané vlastnosti kontaktnej dvojice tribometru RTEC

	Gulička	Disk
Materiál	Ložisková oceľ (100Cr6)	Kalená oceľ (14 220)
Rozmer [mm]	Ø4,75	Ø40
Youngov modul [GPa]	200	200
Poissonov pomer [-]	0,3	0,3
Drsnosť R_a [nm]	10	12

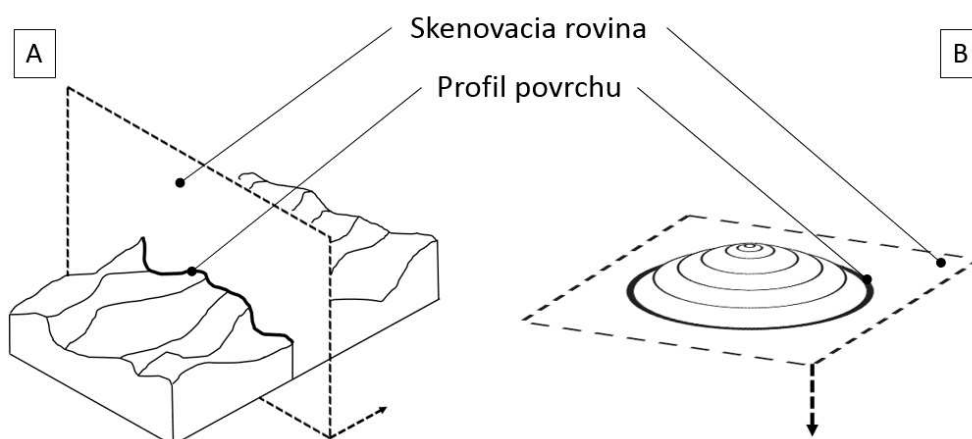
Na obr. 4-15 je zobrazená schéma navrhnutého a vyrobeného rotačného modulu tribometra. Disk je umiestnený vo vaničke s vložkou pre zmenšenie objemu maziva. Vanička pre uchytenie disku je pripevnená k rotačnej platforme tribometru. Otáčky sú riadené prostredníctvom softvéru, v ktorom je možné taktiež nastaviť sekvenciu meraní. Napätie bolo privádzané prostredníctvom odizolovaného kolíku v držiaku tribometra a rotačnej platformy. Počas testu bol kolík pritláčaný na rotujúci disk normálovou silou F_N . Systém meria treciu silu F_X snímačom, na základe čoho je vyhodnocovaný súčiniteľ trenia.



Obr. 4-15 Schéma rotačného modulu RTEC s obvodom

Profilometer Bruker Contour GT-X

Vyhodnocovanie opotrebenia trecích dráh, rovnako ako meranie topografie povrchu bolo vykonávané prostredníctvom profilometru Bruker Contour GT-X, ktorý využíva svetelnú interferometriu bieleho svetla. Profil povrchu v danom mieste vznikne priesečníkom skenovacej roviny a skenovaného povrchu (obr. 4-16). Skenovacia rovina postupne prejde celým povrchom skenovanej súčasti a pomocou softvéru snímané profily spojí do súvislej mapy povrchu. Topografia povrchu je tvorená tvarom, vlnitosťou a drsnosťou, ktoré sa líšia vlnovými dĺžkami. Najkratšie vlnové dĺžky reprezentujú drsnosť povrchu, stredné vlnitosť a najdlhšie tvar, pričom tieto vlnové dĺžky sú separované filtermi.



Obr. 4-16 Profil skenovaného povrchu A) rovinný B) sférický

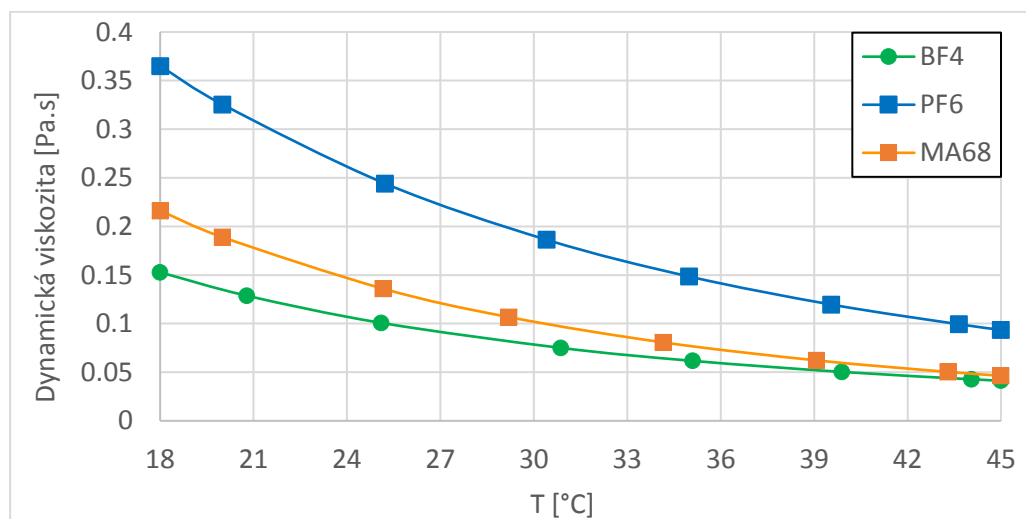
5 VÝSLEDKY

5.1 Optické a reologické vlastnosti

Pre získanie závislosti dynamickej viskozity na teplote podľa Vogelovho vzťahu (5.15) boli hodnoty dynamickej viskozity merané pri rôznych teplotách v stanovenom rozsahu, aby bolo možné vyčíslieť parametre teplotnej závislosti rovnice A, B a C pre každý vzorku.

$$\eta = A \cdot e^{\left(\frac{B}{T+C}\right)} \quad (5.15)$$

Merania viskozity prebiehali s reguláciou teploty v rozsahu 18 – 45 °C. Viskozita bola vyhodnocovaná pre rozsah šmykových spádov 0 – 100 s⁻¹. Výsledky šmykových spádov v rozsahu 0 – 15 s⁻¹ sa nebrali do úvahy, nakoľko vykazovali pomerne odlišné výsledky, v niektorých prípadoch aj nulové hodnoty šmykového spádu. Meranie šmykového spádu bolo pre každú teplotu vykonané štyrikrát. Výsledky meraní boli následne preložené Newtonským a Binghamským reologickým modelom. Preloženie Binghamským modelom udávalo vyššiu spoľahlivosť preloženia výsledkov R^2 min. 0,998 v porovnaní s Newtonským modelom so spoľahlivosťou R^2 min. 0,941, na základe čoho bol Binghamský model zvolený pre vyhodnocovanie výsledkov meraní. Na obr. 5-1 sú zobrazené výsledky meraní z rotačného viskozimetru.



Obr. 5-1 Namerané hodnoty dynamickej viskozity pri rôznych teplotách

Na základe výsledkov z meraní boli vyčíslené koeficienty A, B a C pre Vogelov vzťah (5.15) prostredníctvom softvéru MATLAB za pomoci funkcie *cftool*, pomocou ktorej bola získaná závislosť viskozity na teplote so spoľahlivosťou preloženia $R^2 = 0,998$. Vyjadrené rovnice aj s koeficientami sú uvedené v tab. 5-1 spolu s výsledkami meraní indexov lomu.

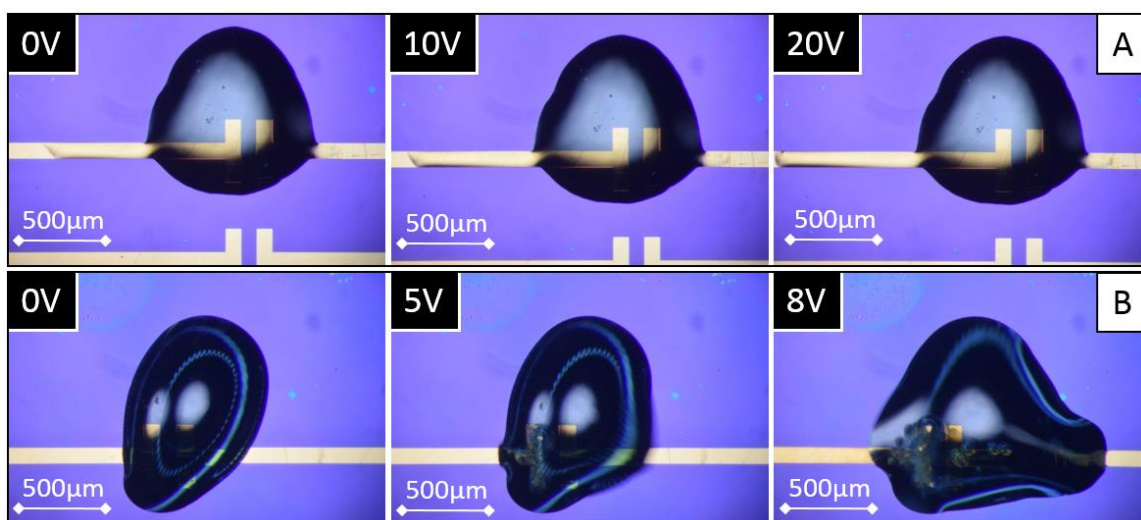
Tab. 5-1 Namerané hodnoty indexu lomu a vyjadrené závislosti viskozity na teplote

Kvapalina	Index lomu n [-]	Vogelov vzťah η (T) [Pa·s]
BF ₄	1,421	$\eta = 0.000582 \cdot e^{\left(\frac{490}{T+69.97}\right)}$
PF ₆	1,410	$\eta = 0.00001041 \cdot e^{\left(\frac{1890}{T+162.6}\right)}$
MA68	1,483	$\eta = 0.0000175 \cdot e^{\left(\frac{1303}{T+120.3}\right)}$

5.2 Optické pozorovanie budenia

Pozorovanie budiaceho obvodu pomocou mikroskopu

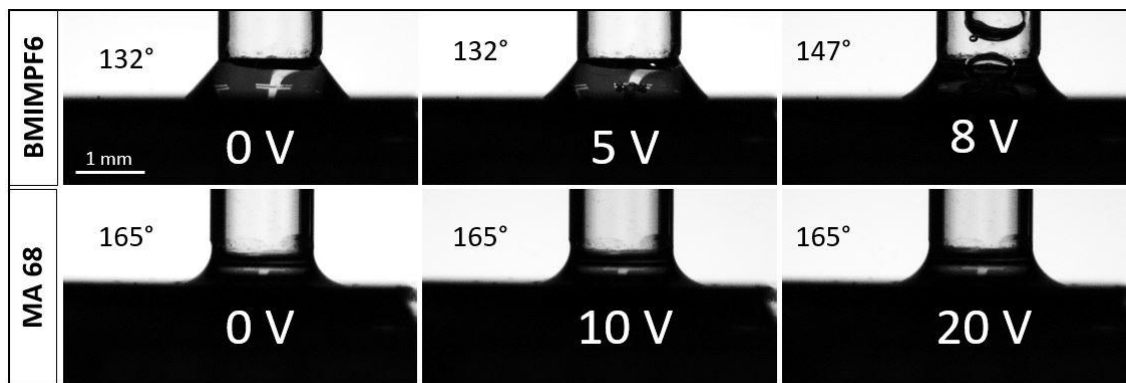
Pre porovnanie správania pri budení boli vykonané komparatívne testy s PF₆ a olejom MA68. Budenie prebiehala pri minimálnom kontrolovanom prúde. Ako je možné vidieť na obr. 5-2 A, budením oleja MA68 nebola pozorovaná žiadna zmena v tvare kvapky, dokonca aj pri vyššom externom napätí 20 V. Budením PF₆ sa pri navýšení napätia kvapka roztekala po okolí a pri napätí približne 5 V sa začali tvoriť bubliny (obr. 5-2 B). Podobné správanie ako PF₆ vykazovala aj kvapka BF₄.



Obr. 5-2 Budenie kvapky elektrickým poľom a) olej MA68 b)PF₆

Pozorovanie zmeny kontaktného uhlu pomocou kapilárneho testeru

Podobne ako v prípade pozorovania kvapky, je možné vidieť zmenu správania pri navýšení napätia s PF_6 (obr. 5-3). Pri napätí približne 5 V došlo k viditeľnej tvorbe bublín, po navýšení na 8 V bola pozorovaná aj zmena v kontaktnom uhle, približne 15° . Pri budení BF_4 bola zaznamenaná iba veľmi malá zmena kontaktného uhla zo 152° pri 0 V na 154° pri 5 V, kedy sa začali tvoriť bubliny. Pri vyššom napätí taktiež dochádzalo k výraznejšej tvorbe bublín ako u PF_6 , ďalšie zmeny kontaktného uhla už neboli zaznamenané. V Porovnaní s iónovými kvapalinami nebola u oleja MA68 pozorovaná žiadna zmena kontaktného uhla, ani tvorba bublín.



Obr. 5-3 Kontaktný uhol iónovej kvapaliny PF_6 a oleja MA68 pri zmene napätia

5.3 Merania viskózne-tlakových súčiniteľov pre predikciu

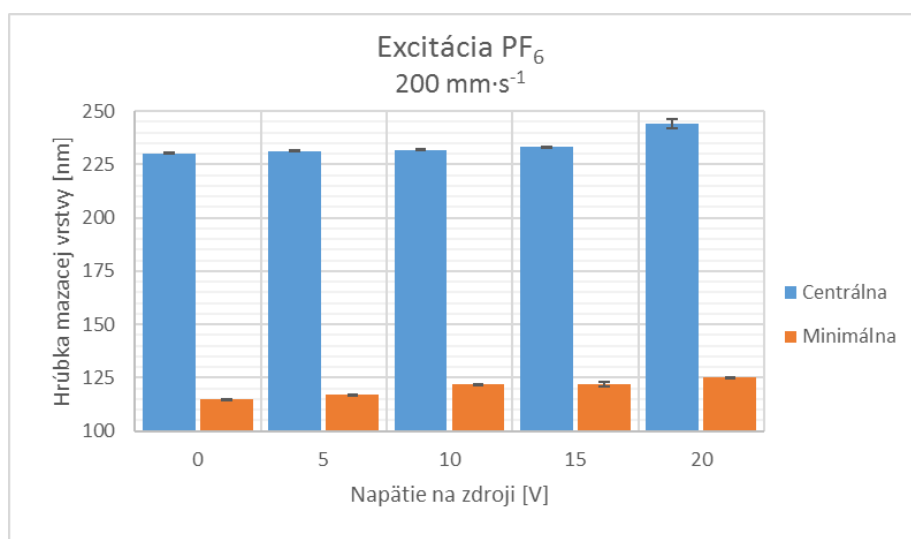
Pre vyčíslenie viskózne tlakových koeficientov boli vykonané merania hrúbky mazacích filmov na optickom tribometri. Kalibrácia bola vykonaná pred meraním, následne prebehli tri merania pri rozsahu rýchlostí $20 - 480 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ pri zaťažení 20 N (odpovedajúce maximálnemu Hertzovmu tlaku 450 MPa) a teplote 25°C . Všetky merania prebiehali pri rovnakých podmienkach. Snímky interferogramov boli vyhodnotené v softvéri Achilles. Regresnou analýzou nameraných hodnôt a pomocou predikčného vzťahu centrálnej hrúbky mazacej vrstvy Hamrock-Dowson [81] bol vyčíslený viskózne-tlakový súčiniteľ pre každé meranie. Z troch hodnôt bola určená priemerná hodnota spolu so smerodajnou odchýlkou. Výsledky s odchýlkou a spoľahlivosťou preloženia meraní sú uvedené v tab. 5-2.

Tab. 5-2 Viskózne-tlakové súčinitele experimentálnych kvapalín

Vzorka	Viskózne-tlakový súčiniteľ	Spôľahlivosť preloženia
	α [GPa ⁻¹]	R ² [-]
[BMIM][BF ₄]	3,6 ± 0,49	0,961
[BMIM][PF ₆]	4,9 ± 0,3	0,995
MA68	20,8 ± 1,3	0,997

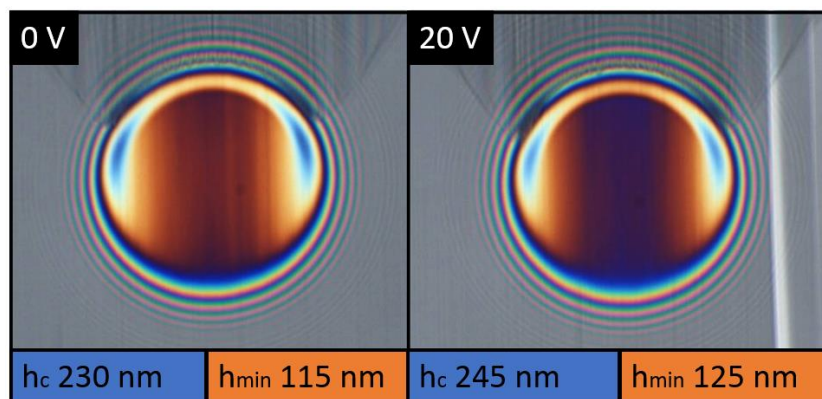
5.4 Vplyv elektrického poľa na hrúbku mazacej vrstvy

Na upravenom optickom tribometri typu „ball-on-disk“ s budiacim obvodom boli vykonané merania mazacej vrstvy vzorky PF₆ v kontakte guľičky a skleneného disku pri čistom valení s konštantou rýchlosťou 200 mm·s⁻¹ a zaťažením 20 N odpovedajúce maximálnemu Hertzovmu tlaku približne 450 MPa. Rýchlosť bola volená overením z predikcie Hamrock-Dowson [81] a rovnice (4.14) pre EHD režim, kedy sú povrchy úplne oddelené súvislou mazacou vrstvou s parametrom mazania $\lambda \approx 7$. Po kalibrácii zariadenia bolo vykonané meranie so zmenou externého napätia. Pre každú hodnotu napätia boli zachytené tri snímky v intervale približne po 1 s, aby sa disk vykonal min. jednu celú otáčku. Interferogramy boli následne vyhodnotené v softvéri Achilles a výsledky sú uvedené na obr. 5-4. Centrálna hrúbka mazacej vrstvy vykazovala výraznejšie zmeny až pri napätí 20 V. V prípade minimálnej hrúbky bola výraznejšia zmena zrejma už pri 10 V.



Obr. 5-4 Závislosť hrúbky mazacej vrstvy na externom napätí

Na obr. 5-5 sú zobrazené interferogramy meraní pri konštantných podmienkach so zmenou externého napätia na zdroji. Na obrázku je možné vidieť zmenu zafarbenia interferogramu v centrálnej oblasti, čo značí zmenu hrúbky. Vyhodnotením v softvéri Achilles bola zistená zmena v centrálnej hrúbke mazacieho filmu vplyvom elektrického poľa približne o 15 nm a minimálnej hrúbke približne o 10 nm. Počas budenia bol nameraný elektrický prúd ampérmetrom, ktorý pri externom napätí 20 V ukazoval hodnotu 0,5 mA.



Obr. 5-5 Interferogramy meraní PF_6 pri $200 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ so zmenou napätia na zdroji

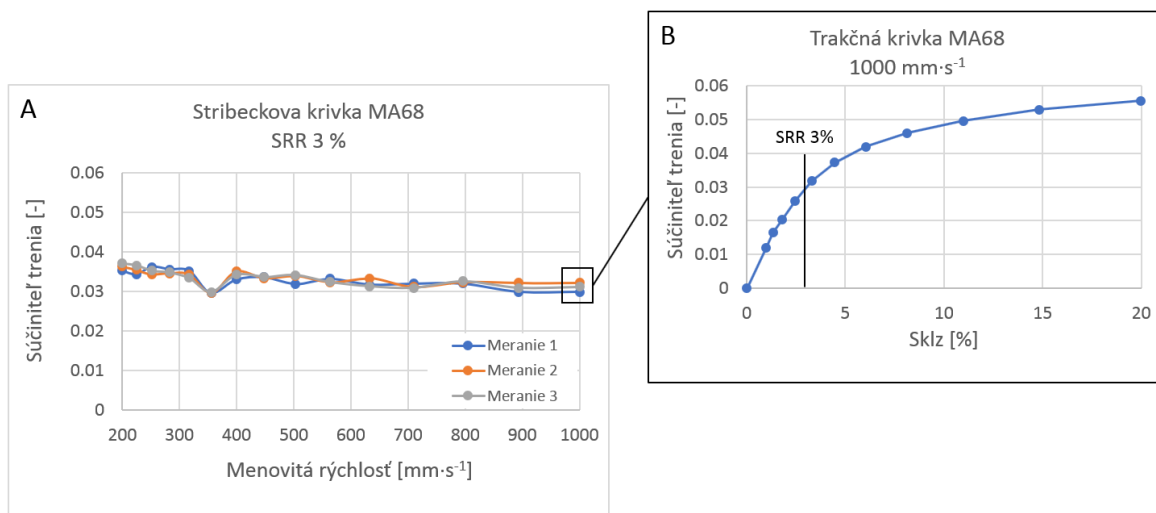
5.5 Vplyv elektrického poľa na trenie

Pomocou predikcie režimu z rovnice (4.14) mazania boli stanovené parametre meraní trecích testov na MTM pre docielenie EHD režimu mazania, kedy sú povrchy úplne oddelené tenkým mazacím filmom a nedochádza k interakciám nerovnosti povrchov, čím sa zamedzí nežiaducemu zahrievaniu maziva v kontaktnej oblasti vplyvom trenia. Cieľom bolo dodržať konštantné experimentálne podmienky a pozorovať zmeny v hodnotách súčiniteľa trenia spôsobené aktiváciou elektrického obvodu uzatváraného mazacím filmom.

5.5.1 Stanovenie parametrov meraní

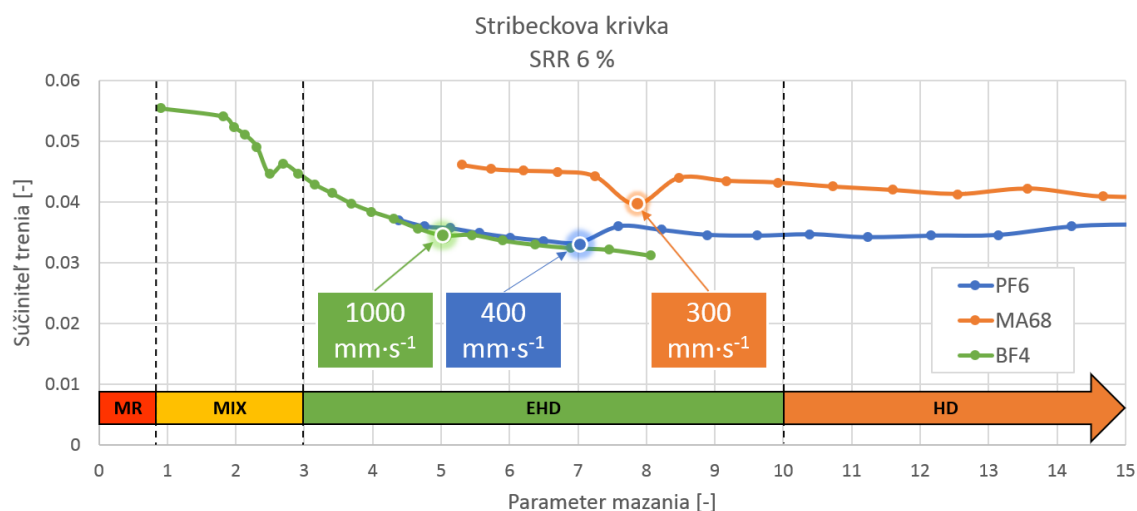
Stanovenie parametrov meraní bolo realizované s olejom MA68 pri zaťažení 5 N odpovedajúce maximálnemu Hertzovmu tlaku približne 660 MPa a teplote okolia 25°C . Aby bolo možné stanoviť hodnoty súčiniteľa trenia počas EHD režimu, je potrebné merania realizovať s hodnotou SRR väčšou ako 1 % a zároveň menšou ako 20 %, aby nedochádzalo k významnému zahrievaniu maziva. Meraná bola Stribeckova krivka trikrát pri SRR 3 %, pričom výsledky jednotlivých meraní vykazujú pomerne dobrú zhodu (obr. 5-6 A). Medzi jednotlivými meraniami Stribeckovej krivky boli vykonané merania trakčnej krivky v rozsahu SRR 0 – 20 % pri konštantnej rýchlosti z meraní Stribeckovej krivky pre overenie hodnôt súčiniteľov trenia (obr. 5-6 B). Na základe výsledkov trakčných kriviek

bola vypočítaná smerodajná odchýlka meraní pre jednotlivé hodnoty SRR, z ktorých vychádza hodnota SRR 6 % s najmenšou odchýlkou, a preto bola táto hodnota zvolená pre testy s budením.



Obr. 5-6 Stribeckova (A) a trakčná krivka (B) oleja MA68

Následne bola zmeraná Stribeckova krivka všetkých kvapalín pri zaťažení 5 N, teplote okolia 25 °C a zvolenej hodnote SRR 6 % v rozsahu rýchlostí 200 – 2000 mm·s⁻¹. Namerané hodnoty boli porovnávané s hodnotami z trakčnej krivky pre overenie správnosti výsledkov. Meranie prebiehalo trikrát a rýchlosti boli prepočítané pomocou predikcie H-D a vzťahu pre približné stanovenie režimu mazania (obr. 5-7), kedy sa podľa predikcie všetky kvapaliny nachádzajú za oblasťou medzného režimu mazania (MR), ktorý nie je predmetom štúdia trecích testov s budením iónových kvapalín. Cieľom meraní bolo nájsť rýchlosť z oblasti EHD režimu mazania s najnižšou hodnotou súčiniteľa trenia pre minimalizáciu vplyvu zahrievania maziva vplyvom trenia. Iónová kvapalina PF₆ sa v uvedenom rozsahu rýchlostí nachádzala v kvapalinovom režime mazania EHD až HD. Pre testy s budením bola zvolená rýchlosť 400 mm·s⁻¹ s najnižšou hodnotou súčiniteľa trenia v oblasti EHD režimu a parametri mazania $\lambda \approx 7$ pre porovnanie s meraním na optickom tribometri. V prípade druhej iónovej kvapaliny BF₄, ktorá sa podľa predikcie nachádzala až do rýchlosti 450 mm·s⁻¹ v zmiešanom režime mazania (MIX) a u ktorej bolo dosiahnuté výrazné minimum súčiniteľa trenia v oblasti EHD mazania v rozsahu rýchlostí do 2000 mm·s⁻¹ až pri maximálnej rýchlosti 2000 mm·s⁻¹, bola zvolená rýchlosť 1000 mm·s⁻¹, za ktorou už nedochádzalo k výraznému znižovaniu súčiniteľa trenia ako do tejto hodnoty. Najvýraznejší lokálny pokles v oblasti EHD je viditeľný u oleja MA68, ku ktorému dochádza pri rýchlosti približne 300 mm·s⁻¹. Olej MA68 slúžil ako referenčné mazivo bez polarizovateľných častíc pre porovnanie výsledkov s iónovými kvapalinami, a preto boli rýchlosti pre experimenty volené na základe výsledkov iónových kvapalín PF₆ a BF₄.



Obr. 5-7 Stribeckove krivky experimentálnych kvapalín s H-D predikciou mazacieho režimu

5.5.2 Test s budením kontaktnej oblasti

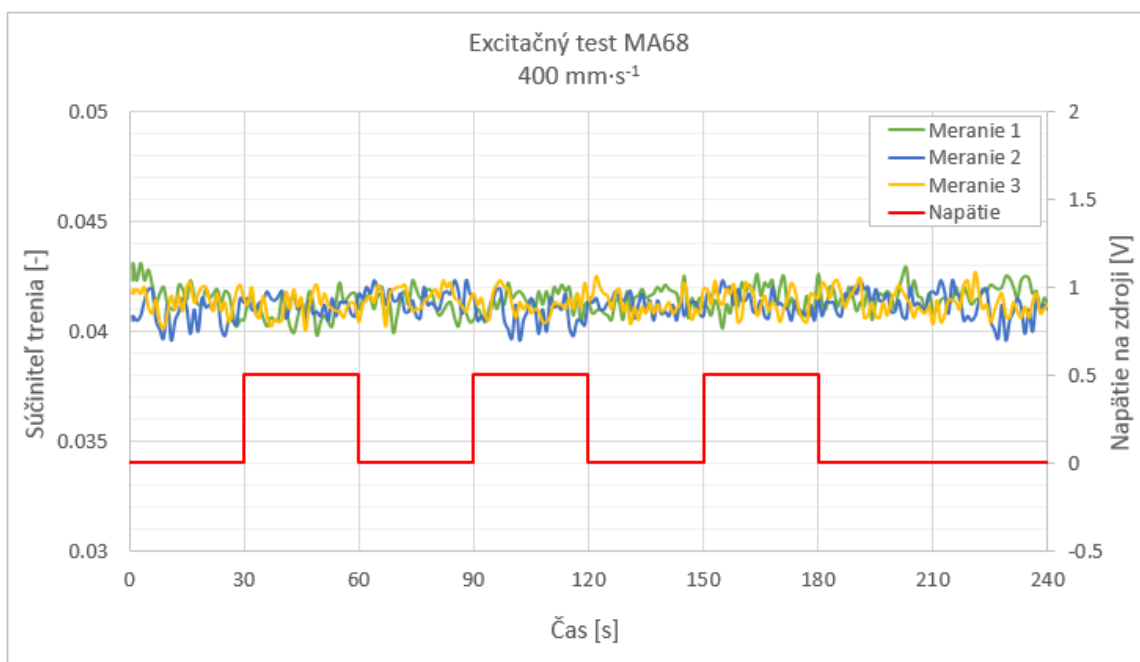
Po určení parametrov bol realizovaný komparačný test iónovej kvapaliny PF₆ a oleja MA68 s budením. Experiment bol vykonaný trikrát, vždy s čistou vzorkou vyčisteným zariadením acetónom pre zamedzenie kontaminácie a skreslenia výsledkov. Experimentálne podmienky sú uvedené v tab. 5-3.

Tab. 5-3 Experimentálne podmienky budiaceho testu

Experimentálne podmienky	
Zaťaženie	5 N ~ 660 MPa
Teplota okolia	26,5 °C
SRR	6 %

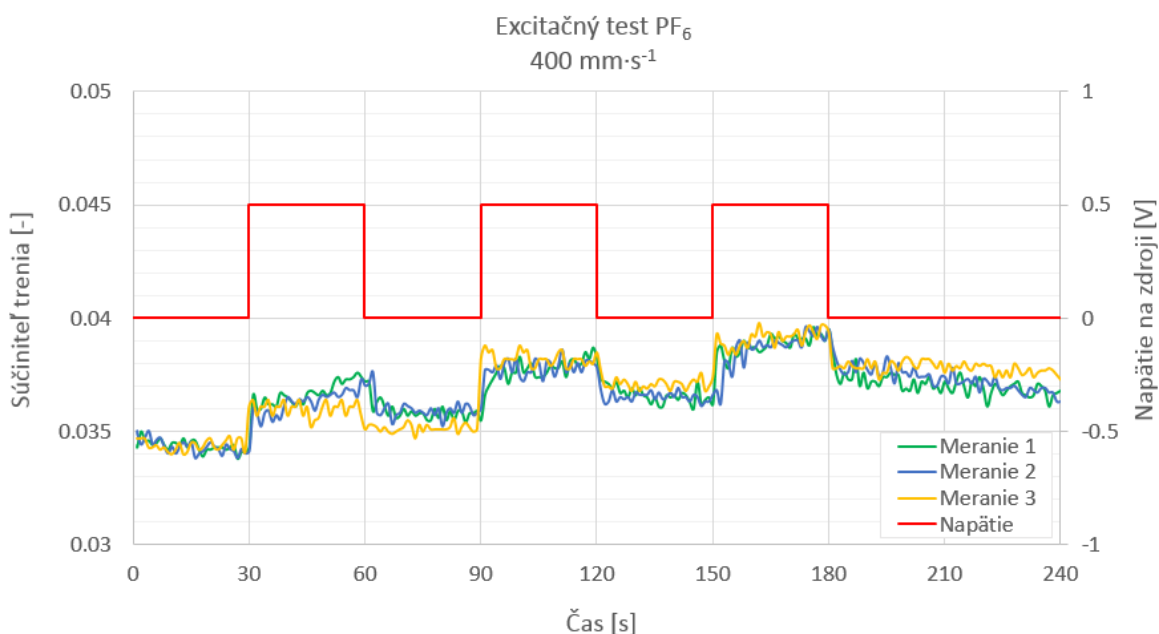
Časový test s opakovaným budením

Na obr. 5-8 je zobrazený priebeh súčiniteľa trenia časového testu MTM. Budenie prebiehalo v intervaloch po dobu 30 sekúnd a 30 sekundovým prerušením obvodu. Po aktivácii elektrického obvodu v čase 30 s je vidieť stály nárast súčiniteľa trenia až do konca testu. Pri aktivácii / deaktivácii obvodu nie sú viditeľné žiadne výrazné skokové zmeny súčiniteľa trenia. Zmena teploty zaznamenaná teplotnou sondou na výtoku z oblasti udáva zmenu max. 0,6 °C pri každom meraní na celom intervale 240 s. Počas aktivácie obvodu bol nameraný elektrický prúd 0,008 A.



Obr. 5-8 Pribeh súčiniteľa trenia MA68 s buđením

V prípade časového testu iónovej kvapaliny PF₆ (obr. 5-9) je vidieť výrazný skokový nárast, resp. pokles súčiniteľa trenia pri zapojení, resp. odpojení elektrického obvodu. Všetky tri merania ukazujú rovnaký trend pri buđením a podobné hodnoty počas celej doby časového testu. Nameraná zmena teploty teplotnou sondou bola počas 240 s každého nepresiahla hodnotu 0,8 °C. Pri napätí 0,5 V ukazoval ampérmeter hodnotu elektrického prúdu 0,42 A.

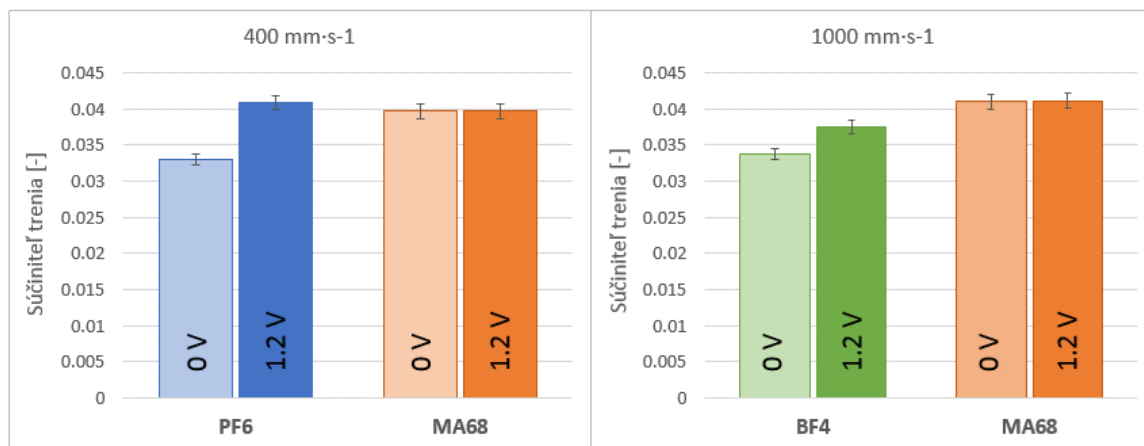


Obr. 5-9 Pribeh súčiniteľa trenia PF₆ s buđením

Intervalový test

Na základe výsledkov časového testu, u ktorého sú v prípade iónovej kvapaliny PF_6 viditeľné výrazné skokové zmeny v hodnotách súčiniteľa trenia bol vykonaný intervalový test s budením pri vyššom napätí 1,2 V po dobu 10 s. Experimentálne podmienky sú rovnaké ako u časového testu (tab. 5-3). Porovnávaná bola iónová kvapalina PF_6 s olejom MA68 pri menovitej rýchlosti $400 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a iónová kvapalina BF_4 s olejom MA68 pri menovitej rýchlosti $1000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, obe s hodnotou SRR 6 %. Každý test prebiehal trikrát, najskôr bez aktivácie a následne s aktiváciou, po ktorej boli disk a guľička očistené acetónom a vysušené.

Na obr. 5-10 sú zobrazené výsledky intervalových testov. Najvýraznejšie zmeny v hodnotách súčiniteľa trenia vykazuje iónová kvapalina PF_6 u ktorej bol zaznamenaný približne 20% nárast. Pri napätí 1 V bola zaznamenaná hodnota elektrického prúdu 1,12 A. Budením iónovej kvapaliny BF_4 bol zaznamenaný menší nárast súčiniteľa trenia, približne 10 %. Hodnota elektrického prúdu ukazovala hodnoty 1,05 A. V prípade oleja MA68 nebola zaznamenaná výrazná zmena v hodnotách súčiniteľa trenia po aktivácii elektrického obvodu s napätím 1 V a elektrickým prúdom 0,04 A. Zmena teploty počas intervalových testov nepresiahla $0,3^\circ\text{C}$.



Obr. 5-10 Výsledky intervalových testov s budením

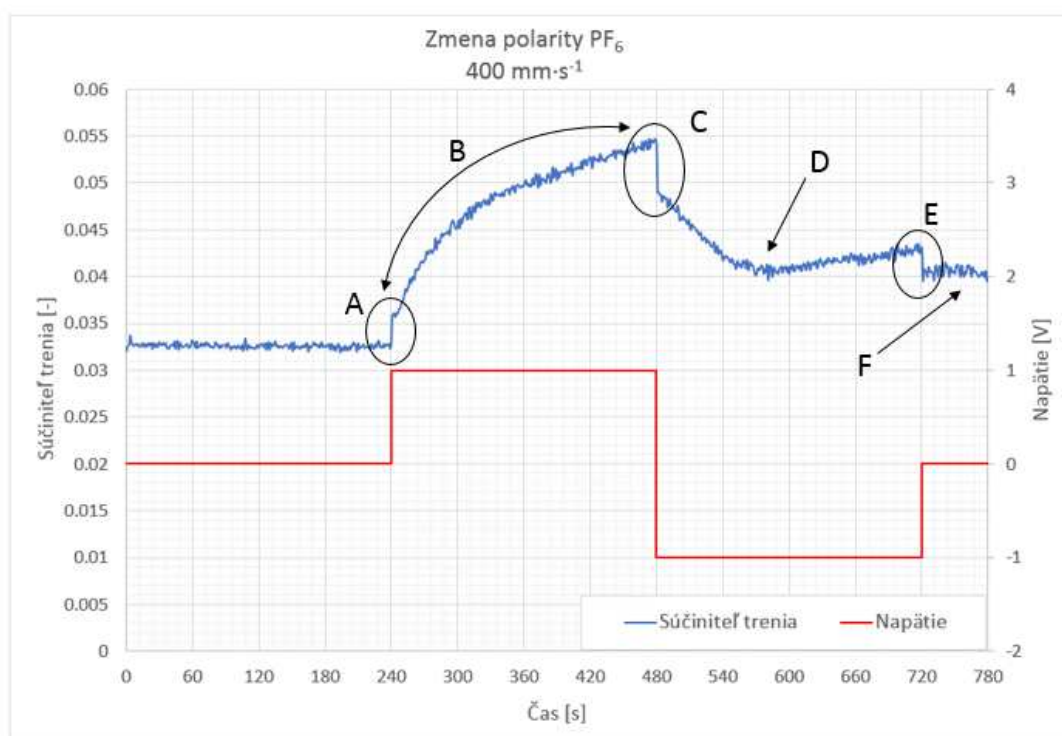
5.5.3 Test vplyvu polarizácie zapojenia

Testy s budením elektrickým poľom prebiehali s obvodom zapojeným podľa obr. 4-14, kedy záporný pól bol privedený na guľičku a kladný na disk. Aby bolo možné overiť vplyv zmeny polarizácie na priebeh súčiniteľa trenia bol realizovaný časový test pri podmienkach uvedených v tab. 5-4 za podmienok plne zaplaveného disku. Do obvodu bol pridaný dvojpólový spínač pre dosiahnutie okamžitej zmeny polarizácie. Test bol vykonaný iba jedenkrát z dôvodu spotrebovania zakúpeného množstva iónovej kvapaliny PF_6 .

Tab. 5-4 Experimentálne podmienky testu zmeny polarity

Experimentálne podmienky	
Zaťaženie	5 N ~ 660 MPa
Teplota okolia	25,5 °C
SRR	6 %
Menovitá rýchlosť	400 mm·s ⁻¹

Výsledky merania časového testu sú zobrazené na obr. 5-11. V momente aktivácie obvodu (A) došlo k skokovému nárastu súčiniteľa trenia. Hodnota súčiniteľa ďalej narastala počas celého intervalu s napätím 1 V (B), pričom bola nameraná hodnota elektrického prúdu 0,93 A. V momente prepnutia polarity (C) došlo k výraznému okamžitému poklesu súčiniteľa trenia, ktorý naďalej klesal až po lokálne minimum (D), následne začala hodnota súčiniteľa trenia mierne stúpať až do okamihu odpojenia obvodu (E), kedy došlo k skokovému poklesu súčiniteľa trenia, ktorý do konca testu vykazoval monotónny priebeh (F). Nameraná hodnota elektrického prúdu pri zápornej polarite bola 0,95 A. Počas celého merania bol teplotnou sondou zaznamenaný nárast teploty na výstupe približne 1,5 °C.



Obr. 5-11 Priebeh súčiniteľa trenia so zmenou polarity

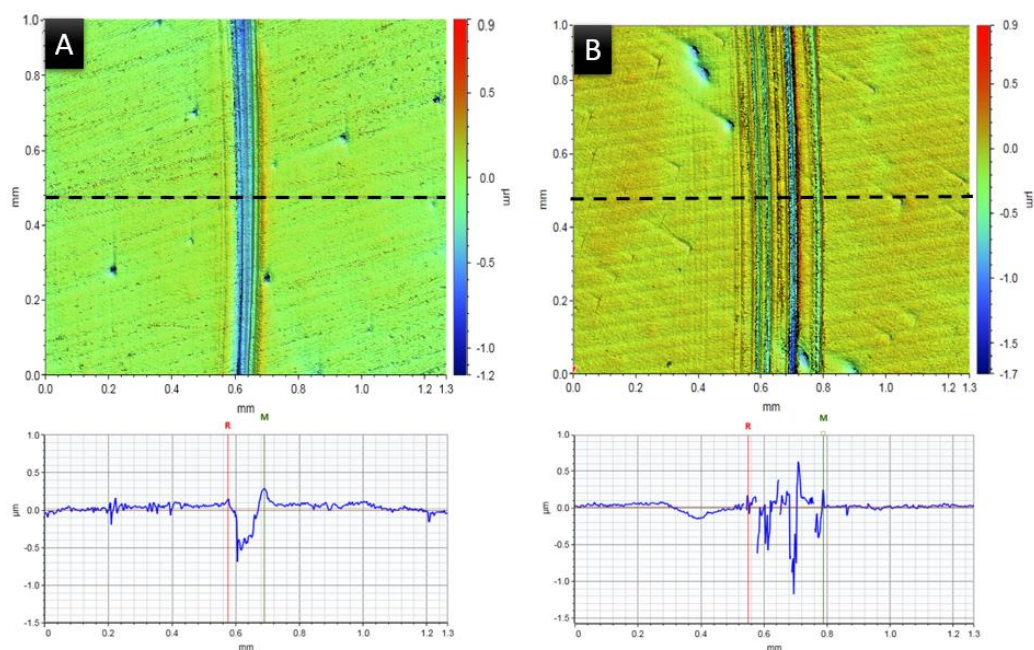
5.6 Vplyv elektrického poľa na opotrebenie

Aby bolo možné overiť vplyv prítomnosti elektrického poľa na opotrebenie kontaktných povrchov, boli realizované testy pri podmienkach čistého sklzu kolíka s guľičkou a v režime zmiešaného mazania pre možnosť vyhodnocovania opotrebenia trecích dráh s budením a bez budenia elektrickým poľom pomocou profilometru. Vzhľadom k nedostatočnému zostatkovému množstvu nebolo možné vykonať testy pre iónovú kvapalinu PF_6 , a preto boli experimenty realizované iba s iónovou kvapalinou BF_4 a zrovnávané s olejom MA68. Experimentálne podmienky sú uvedené v tab. 5-5. Zaznamenávaná bola teplota sondou pripevnenou na výstupe z kontaktnej oblasti.

Tab. 5-5 Experimentálne podmienky testu opotrebenia

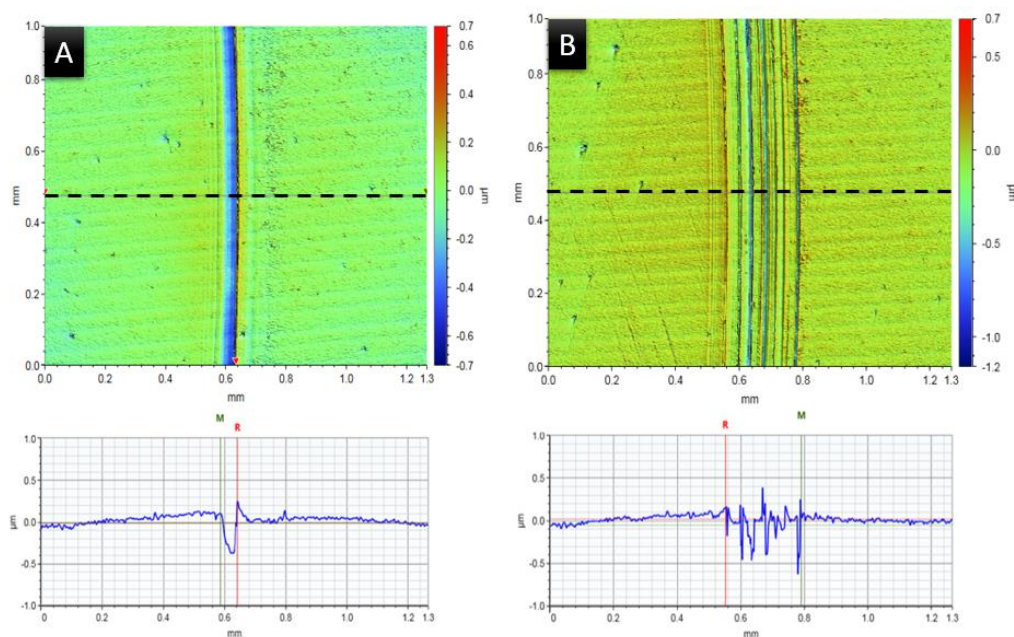
Experimentálne podmienky	
Zaťaženie	5 N ~ 1275 MPa
Teplota okolia	25 °C
Menovitá rýchlosť	300 mm·s ⁻¹
Počet otáčok disku	55 000
Doba trvania	46 min

Počas testu opotrebenia s olejom MA68 bez aktivácie elektrického obvodu bola zaznamenaná zmena teploty počas celého testu z 25,2 °C na 32,3 °C. V teste s aktivovaným obvodom došlo k výraznejšiemu nárastu teploty z 25,4 °C na 39,8 °C. Namerané hodnoty elektrického prúdu pri napätí 0,5 V v priebehu testu narástli z 0,18 A na 0,32 A. Zaznamenaný súčiniteľ trenia vykazoval pomerne stále hodnoty 0,168 pri teste s 0 V a 0,192 pri teste s napätím 0,5 V. Na obr. 5-12 sú zobrazené profily trecích dráh bez budenia kontaktnej oblasti (A) a s napätím 0,5 V (B). V prípade testov s aktivovaným obvodom (B) je možné vidieť rozsiahlejšie poškodenie disku.



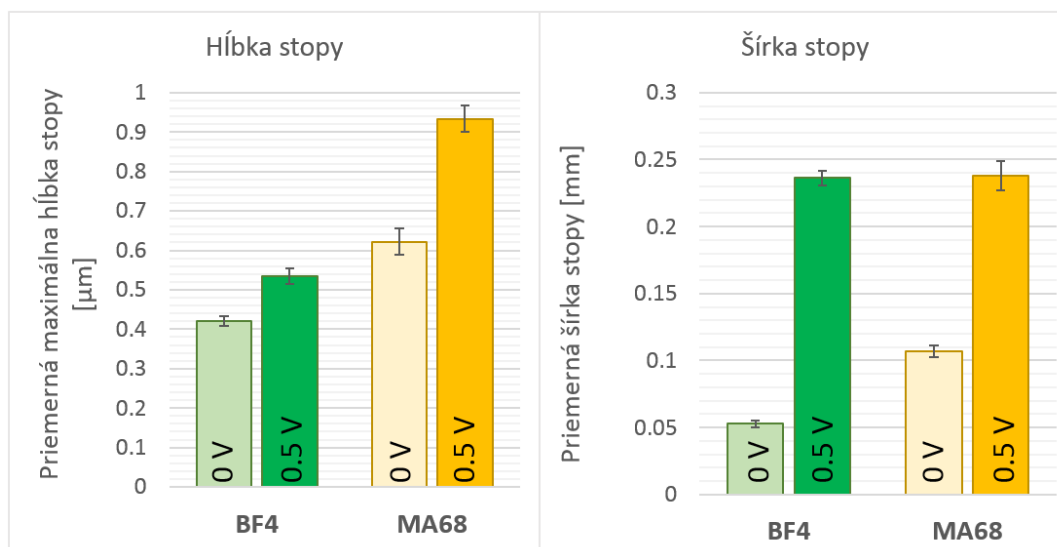
Obr. 5-12 Profily trecích dráh s olejom MA68 pri napätí A) 0V B) 0,5 V

Pri teste opotrebenia s iónovou kvapalinou BF_4 bez aktivácie elektrického obvodu bola zaznamenaná zmena teploty počas celého testu z $25,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ na $30,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. V teste s aktivovaným obvodom došlo k výraznejšiemu nárastu teploty z $25,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ na $38,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Namerané hodnoty elektrického prúdu v priebehu testu s budením narástli z $0,25\text{ A}$ na $0,35\text{ A}$. Súčiniteľ trenia vykazoval pomerne stále hodnoty $0,112$ pri 0 V a $0,165$ pri $0,5\text{ V}$. Na obr. 5-13 sú zobrazené profily trecích dráh bez budenia kontaktnej oblasti (A) a s napätím $0,5\text{ V}$ (B). Podobne ako pri experimentoch s olejom MA68 je možné vidieť rozsiahlejšie poškodenie disku s aktivovaným obvodom (B).



Obr. 5-13 Profil dráhy trecích testov s BF_4 pri A) 0 V a B) 0,5 V

Vyhodnotenie trecích dráh bolo vykonané na 3 rôznych miestach na disku, z profilu povrchu v štyroch rôznych polohách snímky. Hodnotená bola maximálna hĺbka dráhy a šírka. Zo všetkých nameraných hodnôt bola vyčíslená stredná hodnota a priemerná smerodajná odchýlka. Výsledky sú zobrazené na obr. 5-14. Rozsah opotrebenia sa za prítomnosti elektrického poľa v oboch prípadoch zväčšil. V prípade iónovej kvapaliny BF₄ došlo iba k miernemu nárastu hĺbky stopy, avšak k pomerne výraznému zväčšeniu šírky stopy. U oleja MA68 je viditeľné pomerne výrazné zväčšenie hĺbky a šírky stopy.

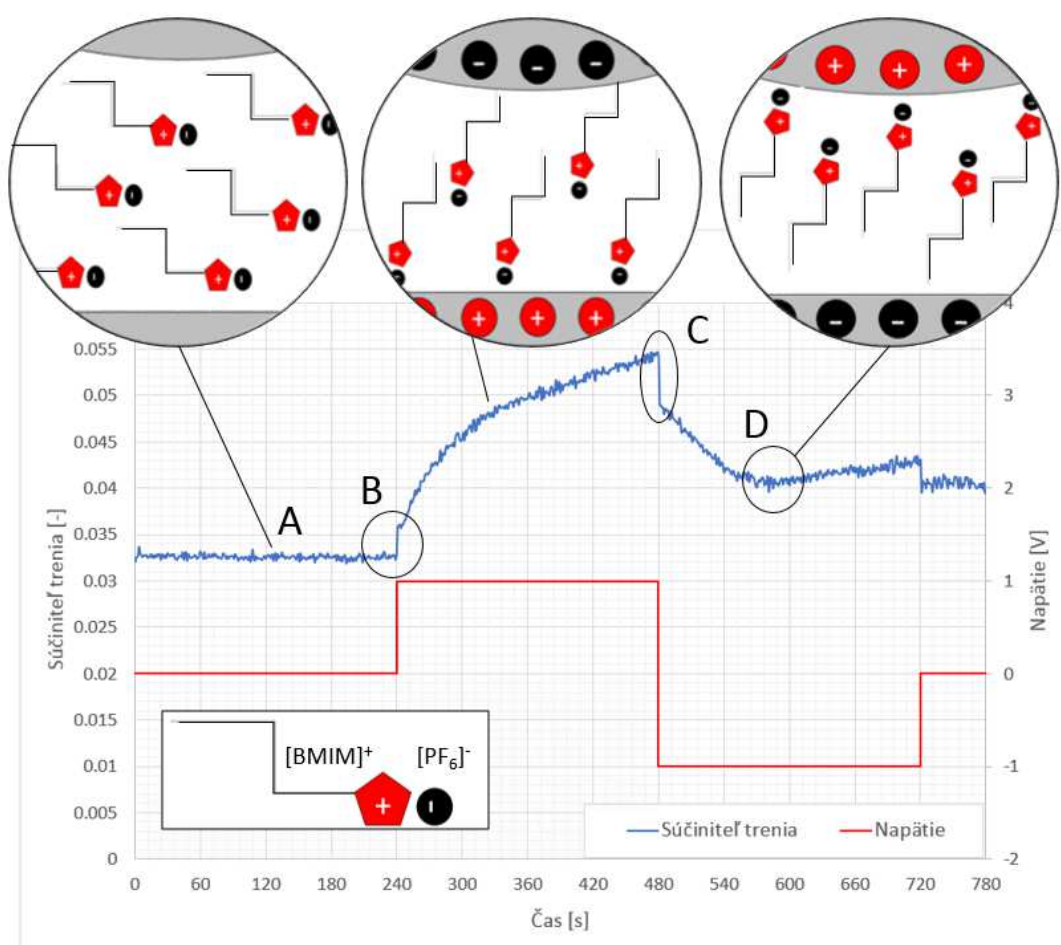


Obr. 5-14 Vplyv aktivácie elektrického obvodu na opotrebenie povrchov

6 DISKUSIA

Porovnanie výsledkov budenia iónovej kvapaliny za podmienok EHD režimu mazania získaných rozdielnymi metódami

Pre možnosť porovnania výsledkov získaných optickým tribometrom a tribometrom MTM boli parametre meraní stanovené na EHD režim s parametrom mazania $\lambda \approx 7$. Prostredníctvom optického tribometru bol nameraný nárast v centrálnej hrúbke mazacej vrstvy približne 15 nm, čo potvrdzuje výsledky experimentálnej práce [84]. Vzhľadom k tomu, že došlo k navýšeniu hrúbky je možné vyvrátiť ovplyvnenie mazacej vrstvy vplyvom lokálneho navýšenia teploty, kedy by došlo k rednutiu maziva a naopak k znižovaniu hrúbky mazacej vrstvy. V prípade meraní súčiniteľa trenia bol zaznamenaný skokový nárast súčiniteľa trenia v okamihu aktivácie elektrického obvodu a následný skokový pokles v momente odpojenia elektrického obvodu, na základe čoho je možné konštatovať, že tento jav je reverzibilný a nárast hrúbky rovnako ako súčiniteľa trenia je spôsobený hromadením alkylových reťazcov iónovej kvapaliny PF₆ v kontaktnej oblasti s budeným elektrickým poľom. Tento mechanizmus bol pozorovaný počas testu polarita na zariadení MTM (obr. 6-1).

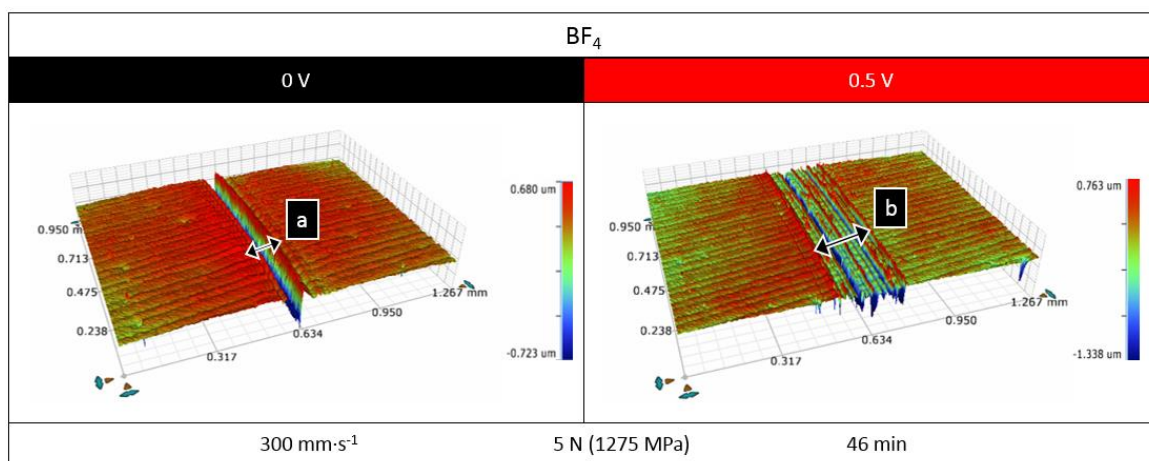


Obr. 6-1 Mechanizmy správania alkylových reťazcov iónovej kvapaliny PF₆ pri zmene polarita obvodu

V iniciálnej fáze merania bez budenia zrejme reťazce prechádzali kontaktnou oblasťou orientované smerom s najmenším odporom proti tečeniu (A). V momente aktivácie (B) sa začali reťazce orientovať podľa polarít povrchov, čo mohlo byť príčinou skokového nárastu hodnoty súčiniteľa trenia. Následne mohlo dochádzať ku kumulácii týchto reťazcov v kontaktnej oblasti, čo by vysvetľovalo stály nárast hodnoty súčiniteľa trenia až do okamihu prepnutia polarít (C), kedy sa pravdepodobne uvoľnili nahromadené reťazce a hodnota súčiniteľa trenia skokovo poklesla a ďalej klesala. V určitom okamihu bol opäť zaznamenaný nárast hodnoty súčiniteľa trenia (D), ktorý mohol byť zapríčinený opätovnou kumuláciou reťazcov opačnou orientáciou v kontaktnej oblasti. Po deaktivácii elektrického obvodu došlo k opätovnému skokovému poklesu súčiniteľa trenia pravdepodobne spôsobeného uvoľnením nahromadených reťazcov. Uvedené vysvetlenie správania iónovej kvapaliny potvrdzujú aj odborné publikácie, ktoré pojednávajú o orientovaní reťazcov iónových kvapalín pôsobením elektrického poľa [85, 86].

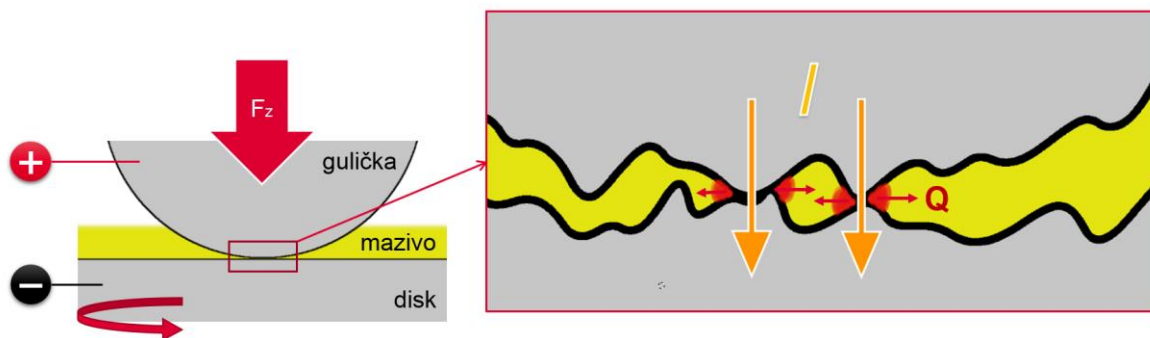
Opotrebenie kontaktných povrchov za podmienok zmiešaného režimu mazania s aktivovaným elektrickým obvodom

Aby bolo možné komparatívne zhodnotiť vplyv prítomnosti elektrického poľa na opotrebenie trecích povrchov, bol realizovaný test za podmienok zmiešaného režimu mazania a vysokého kontaktného tlaku (približne 1,2 GPa). Bez aktivácie napätia je na diskoch viditeľné menšie opotrebenie (obr. 6-2 a), ako v prípade testov opotrebenia s napätím, kedy došlo k rozsiahlejšiemu opotrebeniu (obr. 6-2 b), zreteľnom najmä na zväčšení šírky trecej dráhy pri testoch s iónovou kvapalinou BF₄.



Obr. 6-2 Profil trecích dráh s iónovou kvapalinou BF₄ a) pri 0 V b) pri 0,5 V

Tento jav bol pozorovaný aj v prípade testov s olejom MA68, na základe čoho je možné konštatovať, že po aktivácii elektrického obvodu došlo v oboch prípadoch k odporovému ohrevu maziva v okolí mikrokontaktných spojov, čo zapríčinilo lokálny pokles viskozity vplyvom navýšenia teploty (obr. 6-3), čo mohlo viesť až k prechodu do medzného režimu mazania. Z uvedeného dôvodu je zrejmé, že budenie kontaktnej oblasti v zmiešanom režime mazania má negatívny vplyv na opotrebenie kontaktných povrchov.



Obr. 6-3 Schematické znázornenie priebehu budenia počas zmiešaného režimu mazania

Vplyv budenia iónových kvapalín na kovové prvky experimentálnych zariadení

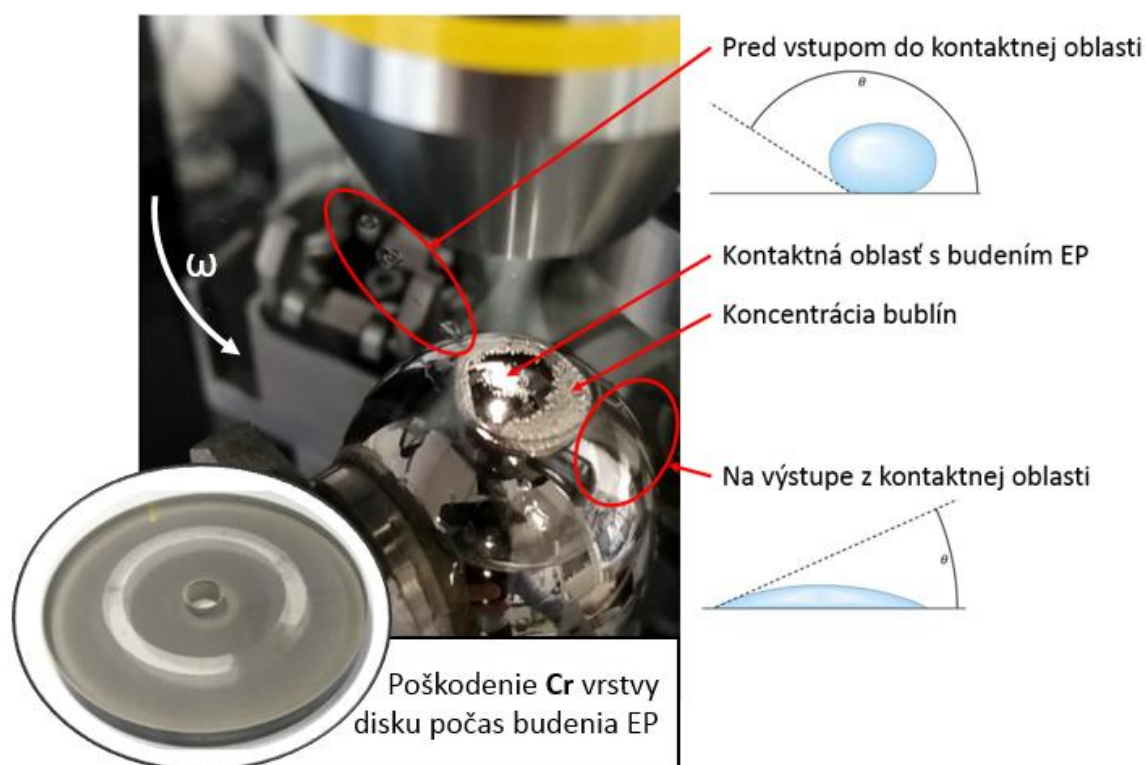
Po optickom pozorovaní správania experimentálnych kvapalín na budiacom obvode bolo pozorované zreteľné poškodenie elektród. Po budení oleja MA68 neboli pozorované žiadne známky poškodenia obvodu alebo elektród (obr. 6-4 A). Na rozdiel od toho, bolo po budení BF_4 pozorované významné poškodenie elektród. V prípade vzorky došlo k úbytku materiálu na elektróde (obr. 6-4 B). Po experimentoch s PF_6 vznikla výrazná korózia iba jednej vetvy obvodu (obr. 6-4 C).



Obr. 6-4 Elektróda doštičky po budení a) oleja MA68 b) BF_4 c) PF_6

V prípade meraní na optickom tribometri bola pozorovaná zmena povahy iónovej kvapaliny, kedy bez budenia el. poľom vykazovala vzorka PF_6 hydrofóbne správanie a iónová kvapalina sa koncentrovala do zhlukov väčších kvapiek, ako možno vidieť na obr. 6-5. Pri zvyšovaní napätia dochádzalo k viditeľnému navýšeniu priľnavosti iónovej kvapaliny. Pri napätí 20 V, kedy boli pozorované výraznejšie zmeny v hrúbke mazacej vrstvy, bola pozorovaná výrazná tvorba bublín v okolí kontaktnej oblasti a na interferogramoch sa začali objavovať biele miesta. Po ukončení merania bolo zistené

výrazné poškodenie chrómovej vrstvy, ktoré bolo zapríčinené pôsobením iónovej kvapaliny v prítomnosti elektrického poľa.



Obr. 6-5 Správanie iónovej kvapaliny počas budenia kontaktnej oblasti na optickom tribometri

Na základe uvedených poznatkov je zrejmé, že iónová kvapalina pôsobí v prítomnosti elektrického poľa na kovové materiály negatívne. Toto tvrdenie potvrdzuje aj experimentálna práca [87], kde bol študovaný elektrochemický rozklad kovových elektród v iónovej kvapaline $[C_4MIM][Cl]$, pričom pri všetkých kovoch bola zaznamenaná oxidácia. Aj napriek tomu, že nebol skúmaný chróm a bola použitá iná iónová kvapalina, je možné uvažovať, že počas budenia došlo k elektrochemickým procesom, ktoré poškodili chrómovú vrstvu.

Zaujímavé zistenie je viditeľné na obr. 6-4 C, kedy došlo k poškodeniu iba jednej vetvy obvodu, čo naznačuje, že v prípade zapojenia opačnej polarít v obvode optického tribometru by nemuselo dôjsť k poškodeniu chrómovej vrstvy. Pre ďalšie štúdium hrúbky mazacej vrstvy iónových kvapalín s budením je taktiež možné použiť disk s nanosenou vrstvou SiO_2 , ktorá by mala slúžiť ako ochrana pred poškodením chrómovej vrstvy. Tu je však nutné uvažovať aj hrúbku SiO_2 vrstvy, ktorá oddiali chrómovú vrstvu od povrchu guľičky, čím dôjde k zníženiu intenzity elektrického poľa v kontaktnej oblasti.

Zhrnutie výsledkov a ich význam

Výsledkom práce je komplexný popis tribologických vlastností a správania zvolených iónových kvapalín v prítomnosti elektrického poľa, ktoré boli porovnávané s minerálnym olejom MA68. Dosiahnuté výsledky diplomovej práce sú nasledujúce:

- Kritické spracovanie rešerše smart kvapalín z oblasti problematiky tribológie, na základe ktorého boli zvolené experimentálne vzorky – iónové kvapaliny [BMIM]PF₆ a [BMIM]BF₄.
- Návrh vhodných experimentálnych prístupov a vytýčenie parametrov, ktoré bolo nutné kontrolovať počas všetkých experimentov s budením: teplota, napätie a elektrický prúd.
- Realizácia úprav dostupných experimentálnych zariadení Ústavu Konštruovania pre možnosť štúdia správania iónových kvapalín s aktivovaným elektrickým obvodom.
- Zachytenie odozvy iónovej kvapaliny na aktiváciu elektrického obvodu prostredníctvom optických metód pozorovania, kvantifikovaná navýšením kontaktného uhla.
- Nárast hrúbky mazacej vrstvy iónovej kvapaliny za konštantných podmienok o 15 nm v centrálnej oblasti a nárast minimálnej hrúbky mazacej vrstvy o 10 nm.
- Opakovane zaznamenaná skoková zmena súčiniteľa trenia, riadená elektrickým napätím.
- Zväčšenie rozsahu opotrebenia trecej stopy za prítomnosti aktivovaného elektrického obvodu.

Poznatky získané v tejto experimentálnej štúdií sú prínosné pre ďalší výskum v oblasti smart kvapalín a pre vývoj pokrokových inteligentných zariadení v rámci súčasného trendu automatizácie v priemysle „Industry 4.0“. Takýto komplexný popis tribologických vlastností smart kvapaliny nebol doposiaľ realizovaný a použitá metodika práce môže poslúžiť pri štúdiu tribologického správania iných iónových kvapalín, príp. iného typu ER kvapaliny.

7 ZÁVER

Diplomová práca sa zaoberá experimentálnym štúdiom vplyvu elektrického poľa na tribologické charakteristiky nekonformného kontaktu mazaného iónovou kvapalinou. Iónové kvapaliny patria do kategórie ER kvapalín, ktoré sú charakterizované zmenou reologických vlastností za prítomnosti elektrického poľa. V minulosti vznikli viaceré odborné publikácie zaoberajúce sa touto problematikou, no aj napriek tomu nebol doposiaľ spracovaný komplexný popis tribologických vlastností danej iónovej kvapaliny, ktorá by mohla byť používaná ako aktívne riadené mazacie médium inteligentných ložísk a iných strojných súčastí v rámci aktuálneho trendu zavádzania smart zariadení „Industry 4.0“. Táto skutočnosť potvrdzuje aktuálnosť riešenej problematiky práce.

V diplomovej práci je zhrnutý súčasný stav poznania smart kvapalín z tribologického hľadiska založená na odborných publikáciách. Kritická rešerš rozdeľuje smart kvapaliny na dve hlavné kategórie podľa spôsobu budenia. Analýzou získaných poznatkov bola zvolená vhodná smart kvapalina a experimentálne prístupy popisu správania v aktivovanom stave. Ďalej je špecifikovaná použitá experimentálna metodika pre riešenie práce s detailným popisom jednotlivých zariadení a vyhodnocovacích metód. Uvedené výsledky optických a reologických vlastností slúžia ako vstupné parametre meraní (optická interferometria) a predikcie mazacieho režimu (Hamrock-Dowson). Výsledky mazacej vrstvy, trenia a opotrebenia boli získané pomocou troch zariadení, ktoré sa podieľajú na komplexnom popise tribologického správania s aktivovaným elektrickým poľom. Získané dáta sú navzájom porovnávané a diskutované, na základe čoho sú vyvodzované závery. Súčasťou práce je mimo tlačených príloh aj dátová príloha na záznamovom médiu zahrňujúca výpočtový model predikcie mazaného režimu podľa Hamrock-Dowsna.

Vytýčený cieľ práce, vrátane čiastkových cieľov, boli splnené v plnom rozsahu. Všetky získané výsledky ukazujú pozorovateľnú odozvu iónovej kvapaliny na aktiváciu elektrického poľa. Výsledky trecích testov dokonca naznačujú, že je možné správanie maziva riadiť skokovo v priebehu milisekúnd, čo by mohlo znamenať výrazný krok k vytvoreniu inteligentných ložísk s externým riadením reológie pre navýšenie efektivity mazania a predĺženie životnosti kontaktných povrchov.

Výsledkom riešenia diplomovej práce je zhrňujúci článok typu Jsc v impaktovanom časopise *Tribology in Industry*, pojednávajúci o tribologických aspektoch smart kvapalín: Tribological Behaviour of Smart Fluids Influenced by Magnetic and Electric Field – A Review [88]. Na základe dosiahnutých výsledkov je taktiež uvažované o ďalšej publikácii založenej na komplexnom popise tribologických vlastností testovaných iónových kvapalín, ktorá je ale z časového hľadiska nad rámec diplomovej práce.

V priebehu práce sa naskytlí nové otázky, ktoré nabádajú k ďalšiemu štúdiu. Napríklad štúdium vplyvu striedavého napätia na tribologické správanie iónových kvapalín. Taktiež by bolo vhodné navrhnúť univerzálne zariadenie umožňujúce komplexné štúdium inteligentných mazív s aktívnym riadením elektrických veličín, ktoré by bolo vybavené transparentným elementom s náhľadom do kontaktnej oblasti. Poprípade študovať tribologické vlastnosti zmesí základových olejov a iónových kvapalín rôznych pomerov.

8 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] CHOI, Seung Bok, Norman M. WERELEY, Weihua LI, Miao YU a Jeong Hoi KOO. Applications of controllable smart fluids to mechanical systems. *Advances in Mechanical Engineering*. 2014, roč. 2014, s. 5–6. ISSN 16878140.
- [2] STANWAY, R. Smart fluids: current and future developments. *Materials Science and Technology*. 2004, roč. 20, č. 8, s. 931–939. ISSN 0267-0836.
- [3] BALMFORTH, Neil J, Ian A FRIGAARD a Guillaume OVARLEZ. Yielding to stress: Recent developments in viscoplastic fluid mechanics Yielding to stress: Recent developments in viscoplastic fluid mechanics. 2014, č. January.
- [4] DE VICENTE, Juan, Daniel J. KLINGENBERG a Roque HIDALGO-ALVAREZ. Magnetorheological fluids: a review. *Soft Matter*. 2011, roč. 7, č. 8, s. 3701. ISSN 1744-683X.
- [5] BOSSIS, G., S. LACIS, A. MEUNIER a O. VOLKOVA. Magnetorheological fluids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2002, roč. 252, č. 1-3 SPEC. ISS., s. 224–228. ISSN 03048853.
- [6] GONCALVES, Fernando D., Mehdi AHMADIAN a J. D. CARLSON. Investigating the magnetorheological effect at high flow velocities. *Smart Materials and Structures*. 2006, roč. 15, č. 1, s. 75–85. ISSN 09641726.
- [7] SONG, Wanli, Min Sang SEONG, Seung Bok CHOI, Chul Hee LEE a Myeongwoo CHO. Tribological characteristics of magneto-rheological fluid for movement sensor application. *Smart Materials and Structures*. 2014, roč. 23, č. 1. ISSN 09641726.
- [8] KARAKOC, Kerem, Edward J. PARK a Afzal SULEMAN. Design considerations for an automotive magnetorheological brake. *Mechatronics*. 2008, roč. 18, č. 8, s. 434–447. ISSN 09574158.
- [9] GRUNWALD, A. a A. G. OLABI. Design of magneto-rheological (MR) valve. *Sensors and Actuators, A: Physical*. 2008, roč. 148, č. 1, s. 211–223. ISSN 09244247.
- [10] ÇEŞMECI, Şevki a Tahsin ENGIN. Modeling and testing of a field-controllable magnetorheological fluid damper. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2010, roč. 52, č. 8, s. 1036–1046. ISSN 00207403.
- [11] CARLSON, J. David a Mark R. JOLLY. MR fluid, foam and elastomer devices. *Mechatronics*. 2000, roč. 10, č. 4, s. 555–569. ISSN 09574158.
- [12] VARELA-JIMÉNEZ, M. I., J. L. VARGAS LUNA, J. A. CORTÉS-RAMÍREZ a G. SONG. Constitutive model for shear yield stress of magnetorheological fluid based on the concept of state transition. *Smart Materials and Structures*. 2015, roč. 24, č. 4. ISSN 1361665X.
- [13] ASHTIANI, M., S. H. HASHEMABADI a A. GHAFARI. A review on the magnetorheological fluid preparation and stabilization. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2015, roč. 374, s. 711–715. ISSN 03048853.
- [14] GOŁDASZ, Janusz a Bogdan SAPIŃSKI. Insight into magnetorheological shock absorbers. *Insight into Magnetorheological Shock Absorbers*. 2015, s. 1–224.

- [15] RICH, Jason P., Patrick S. DOYLE a Gareth H. MCKINLEY. Magnetorheology in an aging, yield stress matrix fluid. *Rheologica Acta*. 2012, roč. 51, č. 7, s. 579–593. ISSN 00354511.
- [16] GENC, S. a P. P. PHULE. Rheological properties of magnetorheological fluids. *Smart Materials & Structures*. 2002, roč. 11, č. 1, s. 140–146. ISSN 0964-1726.
- [17] VIOTA, J. L., F. GONZÁLEZ-CABALLERO, J. D.G. DURÁN a A. V. DELGADO. Study of the colloidal stability of concentrated bimodal magnetic fluids. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2007, roč. 309, č. 1, s. 135–139. ISSN 00219797.
- [18] KUZHIR, Pavel, Modesto T. LÓPEZ-LÓPEZ, Grigory VERTELOV, Christophe PRADILLE a Georges BOSSIS. Shear and squeeze rheometry of suspensions of magnetic polymerized chains. *Rheologica Acta*. 2008, roč. 47, č. 2, s. 179–187. ISSN 00354511.
- [19] BRIGADNOV, I a., a. DORFMANN a A L BRIGADNOV. Mathematical modelling of magnetorheological fluids. *Continuum. Mech. Thermodyn.* 2005, roč. 17, č. 1, s. 29–42. ISSN 0935-1175.
- [20] SUSAN-RESIGA, Daniela. A rheological model for magneto-rheological fluids. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2009, roč. 20, č. 8, s. 1001–1010. ISSN 1045389X.
- [21] BOMPOS, Dimitrios A a Pantelis G NIKOLAKOPOULOS. Simulation Modelling Practice and Theory CFD simulation of magnetorheological fluid journal bearings. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2011, roč. 19, č. 4, s. 1035–1060. ISSN 1569-190X.
- [22] SOHN, Jung Woo, Seung Bok CHOI, Chul Hee LEE a Myeong Woo CHO. Wear Characteristics of Magnetorheological Fluid under Boundary Lubrication. *Advanced Materials Research*. 2009, roč. 79–82, s. 83–86. ISSN 1662-8985.
- [23] BOMBARD, A. J.F., F. R. GONC,ALVES, K. SHAHRIVAR, A. L. ORTIZ a J. DE VICENTE. Tribological behavior of ionic liquid-based magnetorheological fluids in steel and polymeric point contacts. *Tribology International*. 2014, roč. 81, s. 309–320. ISSN 0301679X.
- [24] WONG, P. L., W. A. BULLOUGH, C. FENG a S. LINGARD. Tribological performance of a magneto-rheological suspension. *Wear*. 2001, roč. 247, č. 1, s. 33–40. ISSN 00431648.
- [25] SHAHRIVAR, K., A. L. ORTIZ a J. DE VICENTE. A comparative study of the tribological performance of ferrofluids and magnetorheological fluids within steel-steel point contacts. *Tribology International*. 2014, roč. 78, s. 125–133. ISSN 0301679X.
- [26] KLINGENBERG, Daniel J. Magnetorheology: Applications and challenges. *AIChE Journal*. 2001, roč. 47, č. 2, s. 246–249. ISSN 00011541.
- [27] SEOK, Jongwon, Seong Oh LEE, KYUNG IN JANG, Byung Kwon MIN a Sang Jo LEE. Tribological properties of a magnetorheological (MR) fluid in a finishing process. *Tribology Transactions*. 2009, roč. 52, č. 4, s. 460–469. ISSN 10402004.
- [28] SUN, Huan Wu a Shu Cai YANG. Revolved Surface Finishing with Smart Fluid Abrasives. *Key Engineering Materials*. 2006, roč. 304–305, s. 579–583. ISSN 1662-9795.

- [29] ZHANG, Peng, Kwang Hee LEE a Chul Hee LEE. Reciprocating friction characteristics of magneto-rheological fluid for aluminum under magnetic field. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*. 2014, roč. 24, č. 1, s. 171–176. ISSN 10036326.
- [30] SONG, Wan Li, Chul Hee LEE a Seung Bok CHOI. Sliding wear behavior of magnetorheological fluid for brass with and without magnetic field. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*. 2013, roč. 23, č. 2, s. 400–405. ISSN 10036326.
- [31] LI-JUN, Wang, Guo CHU-WEN, Yamane RYUICHIRO a Wu YUE. Tribological properties of Mn-Zn-Fe magnetic fluids under magnetic field. *Tribology International*. 2009, roč. 42, č. 6, s. 792–797. ISSN 0301679X.
- [32] UHLMANN, E., G. SPUR, N. BAYAT a R. PATZWALD. Application of magnetic fluids in tribotechnical systems. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2002, roč. 252, č. 1-3 SPEC. ISS., s. 336–340. ISSN 03048853.
- [33] HU, Z. D., H. YAN, H. Z. QIU, P. ZHANG a Q. LIU. Friction and wear of magnetorheological fluid under magnetic field. *Wear*. 2012, roč. 278–279, s. 48–52. ISSN 00431648.
- [34] ZHANG, P., K. H. LEE a C. H. LEE. Fretting friction and wear characteristics of magnetorheological fluid under different magnetic field strengths. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2017, roč. 421, s. 13–18. ISSN 03048853.
- [35] SONG, Wan-Li, Seung-Bok CHOI, Jae-Young CHOI a Chul-Hee LEE. Wear and Friction Characteristics of Magnetorheological Fluid under Magnetic Field Activation. *Tribology Transactions*. 2011, roč. 54, č. 4, s. 616–624. ISSN 1040-2004.
- [36] ZHANG, Peng, Kwang-Hee LEE a Chul-Hee LEE. Friction behavior of magnetorheological fluids with different material types and magnetic field strength. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2016, roč. 29, č. 1, s. 84–90. ISSN 1000-9345.
- [37] SHAHRIVAR, K. a J. DE VICENTE. Ferrofluid lubrication of compliant polymeric contacts: Effect of non-homogeneous magnetic fields. *Tribology Letters*. 2014, roč. 56, č. 2, s. 281–292. ISSN 10238883.
- [38] SHEN, Cong, Wei HUANG, Guoliang MA a Xiaolei WANG. A novel surface texture for magnetic fluid lubrication. *Surface and Coatings Technology*. 2009, roč. 204, č. 4, s. 433–439. ISSN 02578972.
- [39] VAZ, Neil, K G BINU, Pruthivi SERRAO, M P HEMANTH, Jeffin JACOB, Nirmal ROY a Eric DIAS. Experimental Investigation of Frictional Force in a Hydrodynamic Journal Bearing Lubricated with Magnetorheological Fluid. 2017, roč. 7, č. 5, s. 131–134.
- [40] HUANG, Wei a Xiaolei WANG. Ferrofluids lubrication: a status report. *Lubrication Science*. 2016, roč. 28, č. 1, s. 3–26. ISSN 1557-6833.
- [41] KE, Heji, Wei HUANG a Xiaolei WANG. Controlling lubricant migration using ferrofluids. *Tribology International*. 2016, roč. 93, s. 318–323. ISSN 0301679X.
- [42] ANAND, Rajbeer Singh a Punit KUMAR. Effect of Starvation on Elastohydrodynamically Lubricated Contacts using Magnetorheological Fluids. 2015, č. MAY, s. 0–6.

- [43] ANDABLO-REYES, Efrén, Juan DE VICENTE, Roque HIDALGO-ÁLVAREZ, Connor MYANT, Thomas REDDYHOFF a Hugh A. SPIKES. Soft elasto-hydrodynamic lubrication. *Tribology Letters*. 2010, roč. 39, č. 1, s. 109–114. ISSN 10238883.
- [44] BOMBARD, Antonio J F a Juan DE VICENTE. Boundary lubrication of magnetorheological fluids in PTFE/steel point contacts. *Wear*. 2012, roč. 296, č. 1–2, s. 484–490. ISSN 00431648.
- [45] HALSEY, Thomas C., James E. MARTIN a Douglas ADOLF. Rheology of electrorheological fluids. *Physical Review Letters*. 1992, roč. 68, č. 10, s. 1519–1522. ISSN 00319007.
- [46] CHOI, Seung-Bok, Jung Woo SOHN, Young-Min HAN a Chul-Hee LEE. Wear Characteristics Under Boundary Lubrication Contacts in Phosphorated Starch-Based Electrorheological Fluid. *Tribology Transactions*. 2010, roč. 53, č. 2, s. 256–265. ISSN 1040-2004.
- [47] XIE, Guoxin, Jianbin LUO, Shuhai LIU, Dan GUO a Chenhui ZHANG. „Freezing” of nanoconfined fluids under an electric field. *Langmuir*. 2010, roč. 26, č. 3, s. 1445–1448. ISSN 07437463.
- [48] ABGRALL, Patrick a Nam Trung NGUYEN. Nanofluidic devices and their applications. *Analytical Chemistry*. 2008, roč. 80, č. 7, s. 2326–2341. ISSN 00032700.
- [49] ARCIFA, Andrea, Antonella ROSSI, Rosa M. ESPINOSA-MARZAL a Nicholas D. SPENCER. Environmental influence on the surface chemistry of ionic-liquid-mediated lubrication in a silica/silicon tribopair. *Journal of Physical Chemistry C*. 2014, roč. 118, č. 50, s. 29389–29400. ISSN 19327455.
- [50] HAO, T. Electrorheological fluids. *Advanced Materials*. 2001, roč. 13, č. 24, s. 1847–1857. ISSN 09359648.
- [51] HALSEY, Thomas C. Electrorheological Fluids. *Science (New York, N.Y.)*. 1992, roč. 258, č. 5083, s. 761–766.
- [52] DONG, Peng, Chunhui WANG a Suoqi ZHAO. Preparation of high performance electrorheological fluids with coke-like particles from FCC slurry conversion. *Fuel*. 2005, roč. 84, č. 6 SPEC. ISS., s. 685–689. ISSN 00162361.
- [53] DAVID, Alessio, Oscar Y FAJARDO, Alexei A KORNYSHEV, Michael URBACH a Fernando BRESME. Electrotunable lubricity with ionic liquids : the influence of nanoscale roughness. 2017, s. 279–297.
- [54] GUN KO, Young a Ung SU CHOI. Negative electrorheological fluids. *Journal of Rheology*. 2013, roč. 57, č. 6, s. 1655. ISSN 01486055.
- [55] LINGARD, S., W. A. BULLOUGH a W. M. SHEK. Tribological performance of an electro-rheological fluid. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1989, roč. 22, s. 1639–1645.
- [56] LUO, J. B., M. W. SHEN a S. Z. WEN. Tribological properties of nanoliquid film under an external electric field. *Journal of Applied Physics*. 2004, roč. 96, č. 11, s. 6733–6738. ISSN 00218979.
- [57] GAO, Yuan, Boce XUE, Liran MA a Jianbin LUO. Effect of liquid crystal molecular orientation controlled by an electric field on friction. *Tribology International*. 2017, roč. 115, č. June, s. 477–482. ISSN 0301679X.

- [58] KONG, Lingling, Wei HUANG a Xiaolei WANG. Ionic liquid lubrication at electrified interfaces. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2016, roč. 49, č. 22. ISSN 13616463.
- [59] HUANG, Wei, Lingling KONG a Xiaolei WANG. Electrical Sliding Friction Lubricated with Ionic Liquids. *Tribology Letters*. 2017, roč. 65, č. 1, s. 1–6. ISSN 1573-2711.
- [60] SU, Jingshi, Haobo CHENG, Yongfu WEN, Yunpeng FENG a Hon Yuen TAM. Investigation into the mechanism for ultra smooth electrorheological finishing using wheel-like finishing tool. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016, roč. 238, s. 124–131. ISSN 09240136.
- [61] CHENG, Haobo, Jingshi SU, Yong CHEN a Hon Yuen TAM. Profile and roughness of electrorheological finishing optical surfaces. *Frontiers of Optoelectronics*. 2015, roč. 8, č. 3, s. 306–313. ISSN 20952767.
- [62] XIE, Guoxin, Jianbin LUO, Dan GUO a Shuhai LIU. Nanoconfined ionic liquids under electric fields. *Applied Physics Letters*. 2010, roč. 96, č. 4, s. 2008–2011. ISSN 00036951.
- [63] MATSUMURA, Yoshiki, Toshihiko SHIRAISHI a Shin MORISHITA. Stiffness and damping of liquid crystal lubricating film under electric field. *Tribology International*. 2012, roč. 54, s. 32–37. ISSN 0301679X.
- [64] XIE, Guoxin, Jianbin LUO, Shuhai LIU, Dan GUO a Chenhui ZHANG. Thin liquid film lubrication under external electrical fields: Roles of liquid intermolecular interactions. *Journal of Applied Physics*. 2011, roč. 109, č. 11. ISSN 00218979.
- [65] XIE, Guoxin, Jianbin LUO, Shuhai LIU, Dan GUO a Chenhui ZHANG. Nanoconfined liquid aliphatic compounds under external electric fields: roles of headgroup and alkyl chain length. *Soft Matter*. 2011, roč. 7, č. 9, s. 4453. ISSN 1744-683X.
- [66] HE, Yu, Jianbin LUO a Guoxin XIE. Characteristics of thin liquid film under an external electric field. *Tribology International*. 2007, roč. 40, č. 10-12 SPEC. ISS., s. 1718–1723. ISSN 0301679X.
- [67] XIE, G. X., G. LI, J. B. LUO a S. H. LIU. Effects of electric field on characteristics of nano-confined lubricant films with ZDDP additive. *Tribology International*. 2010, roč. 43, č. 5–6, s. 975–980. ISSN 0301679X.
- [68] XIE, Guoxin, Lina SI, Dan GUO, Shuhai LIU a Jianbin LUO. Interface characteristics of thin liquid films in a charged lubricated contact. *Surface and Interface Analysis*. 2015, roč. 47, č. 3, s. 315–324. ISSN 10969918.
- [69] XIE, Guoxin, Ziyi CUI, Lina SI a Dan GUO. Destabilization of lubrication oil micropool under charged conditions. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2017, roč. 69, č. 1, s. 59–64. ISSN 0036-8792.
- [70] BOEDO, S. Formation of dynamic reconfigurable electric field gradients in thin lubricant films through transient elastohydrodynamic squeeze film action. *Tribology International*. 2017, roč. 116, č. June, s. 329–337. ISSN 0301679X.
- [71] DE LOS REYES, Juan Carlos a Irwin YOUSEPT. Optimal control of electrorheological fluids through the action of electric fields. *Computational Optimization and Applications*. 2015, roč. 62, č. 1, s. 241–270. ISSN 15732894.

- [72] ZUO, Qiyang, Ping HUANG a Fenghua SU. Theory analysis of asymmetrical electric double layer effects on thin film lubrication. *Tribology International*. 2012, roč. 49, s. 67–74. ISSN 0301679X.
- [73] BOUZIDANE, A a M THOMAS. An electrorheological hydrostatic journal bearing for controlling rotor vibration. *Computers and Structures*. 2008, roč. 86, s. 463–472.
- [74] NIKOLAKOPOULOS, P G a C A PAPADOPOULOS. Controllable high speed journal bearings , lubricated with electro- rheological fluids . An analytical. 1998, roč. 31, č. 5, s. 225–234.
- [75] PARK, Bong Jun, Fei Fei FANG a Hyoung Jin CHOI. Magnetorheology: materials and application. *Soft Matter*. 2010, roč. 6, č. 21, s. 5246. ISSN 1744-683X.
- [76] HARTL, Martin, Ivan KRUPKA, R POLIŠČUK, M LIŠKA, J MOLIMARD, M QUERRY a P VERGNE. Thin Film Colorimetric Interferometry. *Tribology Transactions*. 2001, roč. 2, č. 44, s. 270–276.
- [77] DENSITY, V, J JACQUEMIN, P HUSSON, A A H PADUA a V MAJER. Density and viscosity of several pure and water-saturated ionic liquids. 2019, roč. 8, č. 2006, s. 172–180.
- [78] HÁLA, O. *Měření povrchového napětí kapalin*. B.m., 2017. Vysoké učení technické v Brně.
- [79] KOSTAL, D, P SPERKA, P SVOBODA, I KRUPKA a M HARTL. Influence of Lubricant Inlet Film Thickness on Elastohydrodynamically Lubricated Contact Starvation. *Journal of Tribology*. 2017, roč. 139, č. 5. ISSN 07424787.
- [80] SHIGLEY, Joseph Edward. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. V Brně: VUTIUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [81] HAMROCK, Bernard J a Duncan DOWSON. Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts .3. Fully Flooded Results. *Journal of Lubrication Technology- Transactions of the Asme*. 1977, roč. 99, č. 2, s. 264–276.
- [82] W, Stachowiak Gwidon a Batchelor Andrew W. Elastohydrodynamic Lubrication. In: *Engineering Tribology*. 4th Editio. B.m.: Elsevier, 2014, s. 1. ISBN 9780123970473. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/rcid:kpETE00005/id:kt00C7CAF5/engineering-tribology/elastohydrodynamic-lubrication?kpromoter=Summon>
- [83] STRIBECK, R. *Die wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager*. B.m.: Springer, 1903.
- [84] XIE, Guoxin, Dan GUO a Jianbin LUO. Lubrication under charged conditions. *Tribology International*. 2015, roč. 84, s. 22–35. ISSN 0301679X.
- [85] ZHAO, Yuling, Kun DONG, Xiaomin LIU, Suojang ZHANG, Jianjun ZHU a Jianji WANG. Structure of ionic liquids under external electric field: A molecular dynamics simulation. *Molecular Simulation*. 2012, roč. 38, č. 3, s. 172–178. ISSN 08927022.
- [86] WANG, Yanting. Disordering and reordering of ionic liquids under an external electric field. *Journal of Physical Chemistry B*. 2009, roč. 113, č. 32, s. 11058–11060. ISSN 15206106.
- [87] ABBOTT, Andrew P., Gero FRISCH, Jennifer HARTLEY, Wrya O. KARIM a Karl S. RYDER. Anodic dissolution of metals in ionic liquids. *Progress in Natural Science: Materials International*. 2015. ISSN 10020071.

- [88] MICHALEC, M, P SVOBODA, I KRUPKA a M HARTL. Tribological Behaviour of Smart Fluids Influenced by Magnetic and Electric Field – A Review. *Tribology in Industry*. 2018, roč. 40, č. 4, s. 515–528.

9 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN

Zoznam skratiek:

<i>Skratka</i>	<i>Význam</i>
MR	Magnetoreologický
ER	Elektroreologický
PAO	Polyalfaolefín
STE	State Transition Equation
MKP	Metóda Konečných Prvkov
MRF	Magnetorheological Fluid
CFD	Computational Fluid Dynamics
FF	Ferrofluid
MF	Magnetic Field
EF	Electric Field
IL	Ionic Liquid
PVB	Polyvinyl Butyral
PER	Photo-Electrorheological
SEM	Scanning Electron Microscope
PTFE	Polytetrafluoroethylene
EHD	Elastohydrodynamical
ZDDP	Zinc Dialkyldithophosphate
MEMS	Mikroelektromechanical Systems
MP	Magnetické pole
EP	Elektrické pole
[BMIM][PF ₆]	1-butyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate
[BMIM][BF ₄]	1-butyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate
PDM	Pendant Drop Meter
AR	Antireflexný
3D	Three-dimensional

PLA	Polylaktid
HD	Hydrodynamic
MTM	Mini Traction Machine
SRR	Slide to Roll Ratio
DC	Direct Current

Zoznam symbolov:

<i>Symbol</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Popis</i>
ζ	[V]	Elektrický potenciál
ε	[-]	Excentricita
ρ	[kg·m ⁻³]	Hustota
η	[Pa·s ⁻¹]	Dynamická viskozita
θ	[°]	Kontaktný uhol kvapky
a_H	[mm]	Polomer sférického kontaktu
F_N	[N]	Normálová sila
ν_A	[-]	Poissonov pomer telesa A
ν_B	[-]	Poissonov pomer telesa B
E_A	[Pa]	Modul pružnosti telesa A
E_B	[Pa]	Modul pružnosti telesa B
d_A	[mm]	Priemer telesa A
d_B	[mm]	Priemer telesa B
p_{max}	[MPa]	Maximálny Hertzov tlak
H_c	[-]	Bezrozmerná centrálna hrúbka mazacieho filmu
h_c	[m]	Centrálna hrúbka mazacieho filmu
R_x	[m]	Polomer kontaktného telesa v smere x
k	[-]	Parameter elipticity
a	[mm]	Hlavná polos kontaktnej elipsy
b	[mm]	Vedľajšia polos kontaktnej elipsy
U	[-]	Bezrozmerný parameter rýchlosti
η_o	[Pa·s]	Dynamická viskozita pri nulovom tlaku,

u	[m·s ⁻¹]	Priemerná rýchlosť v smere osi x
E'	[Pa]	Redukovaný modul pružnosti
W	[-]	Bezrozmerný parameter zaťaženia
G	[-]	Bezrozmerný materiálový parameter
α	[Pa ⁻¹]	Viskózne-tlakový súčiniteľ maziva
H_{min}	[-]	Bezrozmerná minimálna hrúbka mazacieho filmu
h_{min}	[mm]	Minimálna hrúbka mazacieho filmu
λ	[-]	Bezrozmerný parameter mazania
F_x	[N]	Trecia sila
f	[-]	Súčiniteľ trenia
ω	[min ⁻¹]	Otáčky
SRR	[-]	Pomer sklzu a valenia
n	[-]	Index lomu

10 ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV

Obr. 1-1 Ložisko od spoločnosti Schaeffler s on-line monitorovaním stavu [www.schaeffler.com]	13
Obr. 2-1 Závislosť šmykového napätia na šmykovej rýchlosti kvapalín [3].....	15
Obr. 2-2 Zaťažovacie módy smart kvapalín [4].....	16
Obr. 2-3 Usporiadanie častíc v smart kvapaline pôsobením externého poľa [12]	16
Obr. 2-4 Porovnanie matematických modelov a výsledkov experimentu [12].....	19
Obr. 2-5 Porovnanie trecích vlastností základového oleja a MR kvapaliny [24].....	20
Obr. 2-6 Porovnanie trecích vlastností MR kvapaliny a ferrokvapaliny [25].....	20
Obr. 2-7 MR suspenzia pred (a) a po pridaní magnetického poľa (b) [26]	21
Obr. 2-8 Rýchlosť opotrebenia kolíka a súčiniteľ trenia s a bez magnetického poľa [30]	22
Obr. 2-9 Súčiniteľ trenia za prítomnosti magnetického poľa a) ferrokvapaliny b) MR kvapaliny [25]	23
Obr. 2-10 Závislosť rádiusu opotrebenia na dĺžke trecej dráhy magnetických kvapalín [25]	23
Obr. 2-11 Súčiniteľ trenia pre rôzne veľkosti intenzity magnetického poľa [31]	24
Obr. 2-12 Disk s magnetickou textúrou [38].....	25
Obr. 2-13 Priebehy súčiniteľa trenia pre rôzne textúry [38]	25
Obr. 2-14 Závislosť bočného výtoku na intenzite magnetického poľa [31].....	27
Obr. 2-15 Stribeckova krivka MR kvapaliny textúrovaných vzoriek [38].....	28
Obr. 2-16 Schematické zobrazenie experimentálneho zariadenia [43]	28
Obr. 2-17 ER kvapalina bez pôsobenia elektrického poľa (a) a s elektrickým poľom (b) [46]	30
Obr. 2-18 Závislosť viskozity na elektrickom potenciáli [54]	31
Obr. 2-19 Oopotrebenie povrchu pri použití oleja Tellus (a) a ER kvapaliny (b) [55].....	32
Obr. 2-20 Závislosť súčiniteľa trenia na napätí [57]	34
Obr. 2-21 Súčiniteľ trenia pre rôzne zaťažovacie podmienky [58]	34
Obr. 2-22 Závislosť trenia na elektrickom prúde iónovej kvapaliny [59].....	35
Obr. 2-23 Závislosť zmeny drsnosti na napájacom napätí [61].....	36
Obr. 2-24 Vplyv elektrického poľa na hrúbku mazacieho filmu [62]	37

Obr. 2-25 Závislosť hrúbky mazacieho filmu na napätí tekutého kryštálu [63]	37
Obr. 2-26 Vplyv elektrického poľa na hrúbku mazacieho filmu [64]	38
Obr. 2-27 Mazacia vrstva parafínu s aditívom pri pôsobení elektrického poľa [67]	39
Obr. 2-28 Negatívny vplyv elektrického potenciálu na mazaciu vrstvu v ložiskách [69].	40
Obr. 2-29 Vplyv elektrického poľa na hrúbku mazacieho filmu [72]	40
Obr. 4-1 Schéma postupu experimentálnych meraní	45
Obr. 4-2 Chemická štruktúra iónových kvapalín A) [BMIM]PF ₆ B) [BMIM]BF ₄	46
Obr. 4-3 Iónové kvapaliny pre experimenty	46
Obr. 4-4 Abbeho refraktomer	47
Obr. 4-5 Rotačný viskozimeter RotoVisco1 so schémou dvojice Double Gap DG41	48
Obr. 4-6 Kremíková doštička pre pozorovanie odozvy so vzorkou	49
Obr. 4-7 Kremíková doštička pripevnená k stolu mikroskopu	50
Obr. 4-8 Schéma kapilárneho testeru s budiacim obvodom	50
Obr. 4-9 Schéma ball-on-disk zariadenia s napájaním [79]	51
Obr. 4-10 Schéma princípu optickej interferometrie	52
Obr. 4-11 Schéma optického tribometru s elektrickým obvodom	53
Obr. 4-12 Schematické zobrazenie veličín EHD kontaktu	54
Obr. 4-13 Schéma kontaktnej dvojice typu „ball-on-disc“ tribometru MTM	58
Obr. 4-14 Schéma kontaktných telies tribometru MTM s elektrickým obvodom	58
Obr. 4-15 Schéma rotačného modulu RTEC s obvodom	60
Obr. 4-16 Profil skenovaného povrchu A) rovinný B) sférický	60
Obr. 5-1 Namerané hodnoty dynamickej viskozity pri rôznych teplotách	61
Obr. 5-2 Budenie kvapky elektrickým poľom a) olej MA68 b) PF ₆	62
Obr. 5-3 Kontaktný uhol iónovej kvapaliny PF ₆ a oleja MA68 pri zmene napätia	63
Obr. 5-4 Závislosť hrúbky mazacej vrstvy na externom napätí	64
Obr. 5-5 Interferogramy meraní PF ₆ pri 200 mm·s ⁻¹ so zmenou napätia na zdroji	65
Obr. 5-6 Stribeckova (A) a trakčná krivka (B) oleja MA68	66
Obr. 5-7 Stribeckove krivky experimentálnych kvapalín s H-D predikciou mazacieho režimu	67
Obr. 5-8 Priebeh súčiniteľa trenia MA68 s budením	68

Obr. 5-9 Priebeh súčiniteľa trenia PF_6 s budením	68
Obr. 5-10 Výsledky intervalových testov s budením.....	69
Obr. 5-11 Priebeh súčiniteľa trenia so zmenou polarity.....	70
Obr. 5-12 Profily trecích dráh s olejom MA68 pri napätí A) 0V B) 0,5 V	72
Obr. 5-13 Profil dráhy trecích testov s BF_4 pri A) 0 V a B) 0,5 V	72
Obr. 5-14 Vplyv aktivácie elektrického obvodu na opotrebenie povrchov.....	73
Obr. 6-1 Mechanizmy správania alkylových reťazcov iónovej kvapaliny PF_6 pri zmene polarita obvodu.....	74
Obr. 6-2 Profil trecích dráh s iónovou kvapalinou BF_4 a) pri 0 V b) pri 0,5 V	75
Obr. 6-3 Schematické znázornenie priebehu budenia počas zmiešaného režimu mazania	76
Obr. 6-4 Elektróda doštičky po budení a) oleja MA68 b) BF_4 c) PF_6	76
Obr. 6-5 Správanie iónovej kvapaliny počas budenia kontaktnej oblasti na optickom tribometri	77

11 ZOZNAM TABULIEK

Tab. 2-1 Zhrnutie vybraných experimentov magnetických kvapalín.....	29
Tab. 2-2 Zhrnutie vybraných experimentov ER kvapalín	41
Tab. 4-1 Hustota a viskozita vzoriek pri 20 °C [77].....	47
Tab. 4-2 Vybrané parametre kontaktnej dvojice tribometru.....	51
Tab. 4-3 Vybrané vlastnosti kontaktnej dvojice tribometru MTM.....	57
Tab. 4-4 Vybrané vlastnosti kontaktnej dvojice tribometru RTEC	59
Tab. 5-1 Namerané hodnoty indexu lomu a vyjadrené závislosti viskozity na teplote.....	62
Tab. 5-2 Viskózne-tlakové súčinitele experimentálnych kvapalín	64
Tab. 5-3 Experimentálne podmienky budiaceho testu.....	67
Tab. 5-4 Experimentálne podmienky testu zmeny polarita	70
Tab. 5-5 Experimentálne podmienky testu opotrebenia.....	71

12 ZOZNAM PRÍLOH

Príloha 1: Prehľadový článok:

MICHALEC, M, P SVOBODA, I KRUPKA a M HARTL. Tribological Behaviour of Smart Fluids Influenced by Magnetic and Electric Field – A Review. *Tribology in Industry*. 2018, roč. 40, č. 4, s. 515–528.

Príloha 2: Výkresová dokumentácia:

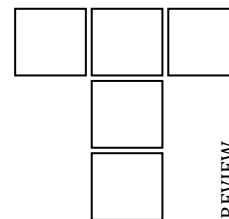
1	Rotačný modul	RTEC-ROT-ASM-01
2	Vanička	RTEC-ROT-PRT-01
3	Disk	RTEC-ROT-PRT-02
4	Kolík s guľičkou	RTEC-ROT-PRT-03
5	Vložka	RTEC-ROT-PRT-04

Príloha 4: Dátové prílohy:

- 1 3D model zostavy rotačného modulu pre zariadenie RTEC
- 2 Namerané dáta
- 3 Hertzova teória a H-D predikcia mazacieho režimu
- 4 Výkresová dokumentácia

PRÍLOHA 1

MICHALEC, M, P SVOBODA, I KRUPKA a M HARTL. Tribological Behaviour of Smart Fluids Influenced by Magnetic and Electric Field – A Review. *Tribology in Industry*. 2018, roč. 40, č. 4, s. 515–528.



Tribological Behaviour of Smart Fluids Influenced by Magnetic and Electric Field – A Review

M. Michalec^a, P. Svoboda^a, I. Krupka^a, M. Hartl^a

^aBrno University of Technology, Technická 2896/2 Brno, Czech Republic.

Keywords:

Smart fluid
Electrorheological fluid
Magnetorheological fluid
Lubricant film thickness
Ionic liquids
Rheology

ABSTRACT

This review paper highlights the tribological behaviour and performance of smart fluids. Two main kinds of smart fluids, that respond to a suitable external stimulus are investigated – electrorheological and magnetorheological fluid. The excitation of an external active field significantly increases or decreases the fluidity, depending on the fluid type. First, the tribological behaviour of both types of smart fluids without the influence of an external field and under the external active field, respectively, are reviewed. Subsequently, the influence of external field activation on the lubricating layer is described. Finally, a summary of the most notable findings of investigated smart fluids performance and behaviour is provided. Possible future applications are then considered for smart lubricants technology and engineering devices.

Corresponding author:

Petr Svoboda
Brno University of Technology,
Technická 2896/2 Brno,
Czech Republic.
E-mail: petr.svoboda@vut.cz

© 2018 Published by Faculty of Engineering

1. INTRODUCTION

In the last decades, there has been an effort to minimize the lubricant film thickness of mechanisms, because of the lower friction and less energy consumption. The optimum performance of a mechanism is strongly dependent on the lubrication of contact surfaces to minimize the friction and wear. Thin film lubrication with respect to severe operational conditions can lead to lubricating film breakdown and consequently, the increase of contact pressure and friction and eventually the increase of wear caused by direct surface interaction. Using the conventional lubricants, it is not possible to control film thickness according to its operational conditions or apply this lubricant for e.g. compressors, bearings,

valves and sealing elements for 100 % oxygen environments. Therefore, there is a desire to secure the controllability using an unconventional lubricant, such as smart fluid [1]. There are numerous fluids that can be called as “smart”, however, this paper is focusing on the fluids influenced by magnetic and electric field. Since the requirements for efficiency of conventional parts and mechanical components, such as bearings, valves, clutches etc. are still growing [2], it is necessary to look for new solutions that could meet the higher requirements. Thanks to the ability to change rheological properties by external influence, the smart fluids are liquids, emulsions or two-phase suspensions made of liquid and solid phase [3]. A base fluid, mostly consisting of oil with additives, forms the disordered liquid phase and

the solid magnetically ordered phase is made of microscopic particles dispersed in the base fluid. Without stimulus of the external active field, smart fluids show Newtonian behaviour, while in the presence of a suitable external field, a noticeable increase of yield stress occurs because of particle response to excitation. Eventually, the flowing of the smart fluid is possible after achieving a certain value of yield stress which is characteristic for Bingham fluids [4].

Such behaviour in combination with the full controllability of rheological properties of the smart fluid could be a new basis of the creation of smart parts and improvement of tribomechanical systems [2]. The main objective of this paper is to review the tribological properties of smart fluids to investigate its possible of application in the future smart mechanisms.

2. SMART FLUIDS INFLUENCED BY MAGNETISM

A smart fluid is a magnetorheological (MR) fluid that is excited by an external magnetic field [5]. Such fluid consists of the base oil, additives and ferromagnetic particles. In absence of the magnetic field, the MR fluid is viscous, heavy, and shows Newtonian behaviour. As soon as the magnetic field is activated, magnetic particles are forced to create a chain structure between exciting poles. The process of chain creation lasts only a few milliseconds and is fully reversible [6,7]. This short response time allows very quick change of rheological properties of the fluid, what is already being used in various applications, e.g. dampers, clutches, brakes etc. [8-13].

Therefore, smart fluids influenced by magnetism have two phases. The liquid phase of MR fluid and the solid phase of MR fluids, respectively.

The base fluid is chosen according to the desired tribological and rheological properties. Moreover, the base fluid should be chemically compatible with particle as well as the device materials. The temperature range of MR fluids is limited by selected base fluid, mostly between - 40 and + 150 °C [14]. Available base fluids are often silicon, mineral, paraffin or hydraulic oils, silicon copolymers, water, and esterified fatty acids. A preferred base fluid is polyalphaolefin (PAO), because of its good

compatibility and the relatively wide operational temperature range [15].

The liquid phase of MR fluid can be modified by various additives to achieve the best possible performance in given application. In the case of MR fluids, the most important additives are surfactants for improving surface properties of particles and stabilizers that keep particles diffused and reduce sedimentation. According to Rich [16] it is possible to reduce the sedimentation ratio of MR fluid after mixing in synthetic clay, which shows a growth of yield stress with aging.

The solid phase of an MR fluid consists of ferromagnetic particles, reacting to the presence of magnetic field. The size of ferromagnetic particles ranges between 1 to 100 µm [17]. Particles larger than 100 µm might cause jamming in devices and increase of friction and wear. On the other hand, particles smaller than 1 µm are not able to create as high resistance to flow as larger particles [15]. Such fluids with particles smaller than 1 µm (mostly around 10 nm) are also called ferrofluids. This type of MR fluid keeps the flowing form even when subjected to the stronger magnetic field. Because of this unique property, ferrofluids are suitable as a sealing medium for dynamic seals [18,19].

Particles dispersed in MR fluids are mostly spherical, because of the longer durability, lower friction and magnetic anisotropy. Except spherical particles were applied suspensions with cone [20] or flake-shaped [21] particles and polymerized chains [22]. These chains reportedly exhibited higher resistance to flow, even when subjected to magnetic field, what might be caused by creation of more complex fluid regarding to friction. The main disadvantage of polymerized chains is its slower response to magnetic field stimuli, than spherical particles, because of the lower magnetization of polymerized chains. Mostly used MR suspensions are made of one type of magnetic particles, nevertheless, there are already applied bimodal suspensions formed by different sizes of particles. Viota [23] combined particles size of 1.5 µm and 8 nm in one MR fluid. According to results of experiments, such combination had slightly better stability of colloid mixture and lower sedimentation rate. Commercial MR fluids consist of 20 to 48 wt.%

of particles. With the density from 2300 to 4120 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ depending on the number of dispersed particles, the MR fluid is a much heavier fluid than pure oil [24]. The solid phase should exhibit relatively high magnetization saturation, up to 2 T [15]. Particle materials are often pure iron and iron alloys, carbonyl iron, iron oxides, nickel, cobalt etc. [8]. Most used solid phase of an MR fluid are pure iron and carbonyl iron, which exhibit relatively high magnetization saturation, around 2.15 T, while the cost is low in comparison with other potential materials [3].

An alternative way to analyse the characteristics and behaviour of MR fluids is using the mathematical analysis. Combining the knowledge of MR fluids and the experimental results provides the foundation of the mathematical equations describing the function of an MR fluid. There were several papers that dealt with the preparation of computing models of MR fluids with response to magnetic field intensity, describing system of constitutive equations for an isotropic MR fluid and a new rheological model for MR fluids that fits the experimental data and can be implemented to CFD analysis [25-27]. Another study proposed a constitutive model for shear yield stress of MR fluid, that considers the material of MR particles and the stimulus applied [28]. The results show, that the developed state transition equation (STE) shows a good agreement with the experimental results of listed MR fluids.

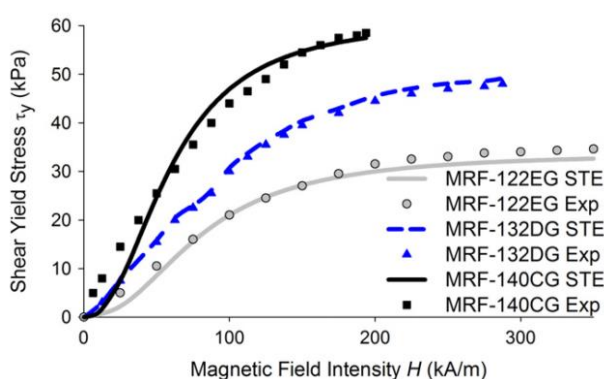


Fig. 1. Comparison of experimental and predicted shear yield stress by constitutive model (under licence CC BY 3.0) [28].

Such model can be implemented in FEM analysis software which could be helpful while designing new MR devices [28].

3. TRIBOLOGICAL BEHAVIOUR OF MAGNETIC FLUIDS

Particles dispersed in base fluid might cause various types of wear depending on the loading regime and component design. In the case of MR fluids, the most significant wear is abrasive, eventually leading to the erosive wear of contact surfaces, thus to understand those negative effect is essential for minimizing and preventing damage. Therefore, it is also important to understand MR fluids in absence of magnetic field as well as to examine in the presence of magnetic field.

3.1 Tribological behaviour of non-activated magnetic fluids

Previously, several studies focused on the examination of magnetic fluids without activation of an external magnetic field were introduced. The results of an experimental study dealing with the colloidal stability show, that a small amount (around 6 wt.%) of nanoparticles (8 nm diameter) in MR fluid of microparticles (1.45 μm diameter) can reduce the sedimentation rate. However, the height of the sediment increases with the number of nanometer-sized particles [23]. Another study shows that MR fluid with 20 to 40 wt.% of spherical particles with diameters of 1 to 5 μm can result in a lower friction coefficient than its base oil [29]. The behaviour of MR fluid is very similar to its base fluid, however, as soon as a larger number of particles gets into the contact area, abrasive wear occurs due to clustering of particles. The extent of damage is more significant with the increasing size and quantity of dispersed particles. A comparative study was done by Shahrivar et al. [30], where two types of MR fluids were examined in a point contact with pure sliding – a ferrofluid containing nanoparticles of 5.5 wt.% and a MR fluid with microparticles of 32 wt.%. The results show, that microparticles perform better at very low sliding speeds to 1 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, however, with increasing speed, the friction coefficient increased significantly. Nanoparticles showed opposite effect. As the sliding speed increased up to 1000 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, the friction coefficient decreased to approx. 25 % of its initial value as it is shown schematically in Fig. 2. This behaviour was reportedly caused by a lower concentration of

nanoparticles at a higher speed, thus smaller amount of partial friction contacts.

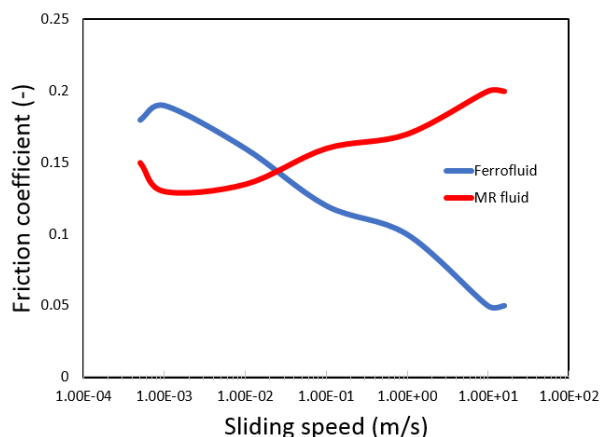


Fig. 2. Comparison of Ferrofluid and MR fluid performance.

3.2 Tribological behaviour of activated magnetic fluids

Although there were noticeable effects in tribological properties of MR fluids without the presence of magnetic field [29,31,32], the activation of external field might significantly modify performance and behaviour of the magnetic fluid [33]. Magnetic field forces dispersed particles to form chains according to magnetic flux, which leads into increasing of the apparent viscosity of MR fluid as shown in Fig. 3 [34].

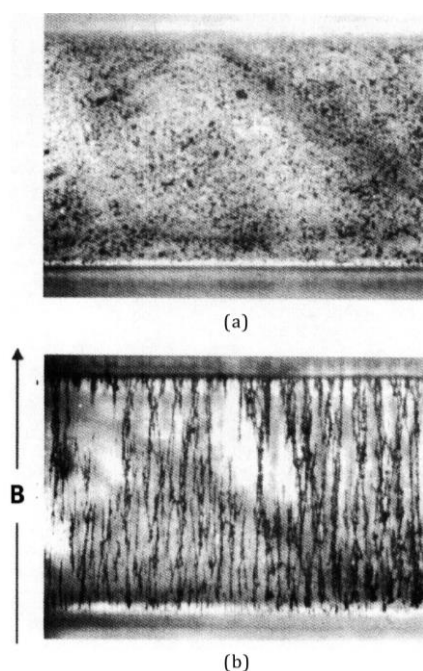


Fig. 3. MR suspension before (a) and after applying a magnetic field (b) (reprinted with permission from John Wiley & Sons, Inc.) [34].

The MR effect can be increased with increasing magnetic field intensity. Because of this ability MR fluids can be used in the finishing process of surfaces [35-37]. By using this process, very smooth surfaces with minimal damage can be achieved, since there is no direct contact of tools like that presented in a conventional machining, only rotating magnet creating permanent magnetic field. The dominant mechanism occurring during a finishing process is the abrasion. By adjusting the size of abrasive medium, magnetic field intensity and speed of rotating magnet, surface roughness R_a lower than $0.05 \mu\text{m}$ without the appearance of surface or subsurface defects can be achieved [37].

To obtain tribological characteristics of MR fluids, especially coefficient of friction and wear rate, a pin-on-disc tribometer was applied in several studies [38-40]. These characteristics were measured both with and without the use of external magnetic field. The disc was placed in the electromagnet and the contacting interface was immersed in the MR fluid [38]. Activation of magnetic field caused a decrease in coefficient of friction in case of magnetic fluids containing 6 to 35 wt. % of particles, explained as result of formation of a protecting film created by nanoparticles adsorption on contact surfaces [39,40]. As for MR fluids with the content of particles 72 to 86 wt.% the results were different [41]. Such relatively high content of magnetic particles creates the excessive growth of yield stress, that leads to the increase of friction coefficient [42,43]. As it is shown in a study [17], the dynamic yield stress exhibited an increase with the volume fraction of magnetic particles. The influence of non-homogenous magnetic field was examined by Shahrivar [44] in a compliant polymer contact lubricated by ferrofluid. They found a noticeable reduction of friction by modification of magnetic field distribution through a moving magnet under the contact area. This phenomenon was confirmed experimentally, as well as by simulation, which achieved a similar trend and values of friction coefficient.

Besides the amount of solid phase, frictional characteristics can be modified by adjusting surfaces surrounding the MR fluid. Such modification is achieved by texturing lubricated contact surfaces [45]. The change in surface profile causes the lubricant to be kept in the contact area, thus the dimples act like reservoirs.

Table 1. Summary of experiments – magnetic fluids.

Author	Specimen details	Viscosity [mPa·s]	Activation [mT]	Measured Characteristics	Experimental Rig	Load	Results
Li-Jun et al. 2009 [39]	Ferrofluid 20 nm 6 wt. %	N/A	0 – 80	Coefficient of friction (COF), Side leakage	Four-ball tester	392 N	Lower COF, reduced side leakage
Shen et al. 2009 [45]	Ferrofluid 15 nm 4.83 wt. %	67	0 – 10	COF	Pin on disc	20 N	Lower COF
Reyes et al. 2010 [50]	Ferrofluid 9 nm 5.5 wt. %	46 – 560	0 – 150	COF	Ball on disc	7 N	Reduced starvation
Song et al. 2013 [38]	MR Fluid 1 – 4 μ m 32 wt. %	92 \pm 15	0.5	COF, Wear rate	Pin on disc	20 – 100 N	Lower COF, wear rate reduction
Zhang et al. 2015 [41]	MR Fluid 72 – 86 wt. %	42 - 280	9	COF	Pin on disc	10 N	Higher COF

In the matter of magnetic fluids, a magnetic texture was created to improve the lubricant behaviour. The magnetic texture was manufactured using photolithography by filling the hollows with a magnetic film. At low sliding speed the magnetic texture causes “anti-friction” effect and keeps even more lubricant in comparison with simple texture. As the speed rises, the coefficient of friction value increases because of the higher yield stress.

3.3 Magnetic field effect on the lubricating layer thickness

The intensity variation of magnetic field applied on MR fluid causes changes in rheological properties, for instance, viscosity and load capacity [33,46]. Therefore, a considerable effort has been made to improve or replace commercial oils due to the requirements for a higher load capacity of mechanisms and trend of lowering the lubricant layer. Thereby, ferrofluids seem to be a suitable lubricating medium, because of their composition. The particle size of ferrofluids is relatively small, so there is much lower number of partial frictional contacts [47], however a change excited by external magnetic field can be achieved. The most important purpose is keeping the lubricant in contact area to prevent lubricant starvation and migration [39,48,49]. There was a study dealing with controlling of starvation in a ball-plate contact under sliding-rolling conditions using ferrofluid composed of 5.5 wt. % 9 nm particles. The

contact area of the rotating aluminium disc and elastomer ball was excited by magnets underneath. The results show, that it is possible to reduce starvation using the magnetic field near the contact area [50].

The most important experimental studies of magnetic fluids are listed with parameters and achieved results in Table 1.

4. SMART FLUIDS INFLUENCED BY ELECTRICITY

Some of the smart fluids are sensitive to an external electric field stimulus, i.e. Electrorheological (ER) fluids [51]. ER fluid is a smart fluid that reacts to excitation of external electric field by creating chain structures between exciting poles as shown schematically at Fig. 4. This reaction changes the rheological properties of the ER fluid. The response time is generally around 10 ms and is strongly dependent on the particle size, magnitude of the excitation source and response of the entire system [52]. There are two types of ER fluids [53].

Positive - when there is an increase of yield stress and viscosity in the presence of an external electric field (e.g. polymers, fullerenes, liquid crystals, etc.) [53] and negative – when there is a decrease of yield stress and viscosity in the presence of external electric field (e.g. journal bearings, dampers etc.) [54,55]. Both, positive and negative

ER fluids can be used in applications [56–58], such as valves, dampers, journal bearings, microelectromechanical systems (MEMS), etc.

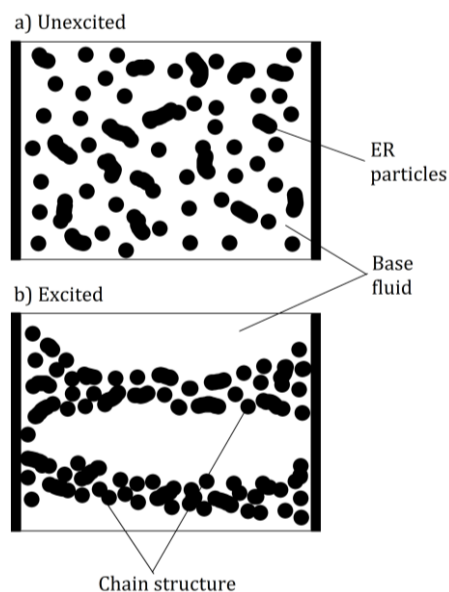


Fig. 4. Activation of ER fluid: (a) without electric field, (b) with electric field.

These fluids can be divided into three categories. Natural ER fluid – a fluid performing ER effect without additives (e.g. ionic liquids). Emulsion – a mixture of base oil and natural ER fluid (e.g. fatty alcohol in base oil) and suspension – made of polarizable particles dispersed in the base fluid.

Materials in liquid state, that can be excited by an external electric field without any additives are called natural ER fluids. An example of this category is ionic liquid – salts in liquid form with low melting points [59–61]. Ionic liquids are neutral to bright yellow transparent fluids containing organic or inorganic cations and anions. They also have relatively good chemical and thermal stability and they are non-flammable. The viscosity of ionic liquids varies from 20 to 200 mPa·s at 25 °C, according to the fluid composition. Another example for natural ER fluids are liquid crystals – organic liquids characterized by the “long-range” order of its molecular orientation [62,63]. The orientation changes according to concentration and temperature, respectively. Liquid crystals have been developed for displays of computers or television, however, there is a potential of application in tribomechanical systems as a smart fluid [60,64,65]. The main advantage of natural ER fluids is high sedimentation stability.

On the other hand, the cost of mentioned liquids is relatively high [66].

When there is a need to make a natural ER fluid thinner, to adjust fluid properties or to combine two liquids with natural ER effect [66], an emulsion ER fluid is preferred. Such fluid is normally made of two liquid phases – base fluid (mostly oil or water) and a fluid that shows ER effect. There is good sedimentation stability in case of emulsion ER fluids, since there are no large particles present. For emulsion, a base fluid with good tribological behaviour can be used, normally mineral oils. Fluid with ER effect such as the liquid crystals, ionic liquids [66], acids (e.g. oleic or lauric) [67], paraffin, alcohol [68], etc. can be used. The concentration depends on the desired strength of ER effect and rheological properties [53].

Like the MR fluids, ER fluids can be also composited of base fluid, additives and a solid phase – in this case, dispersed polarizable particles. The base fluid can be made from isolating oil or another non-conductive fluid with high chemical stability. Most used base fluids are transformer, silicon, mineral or vegetable oils, kerosene, liquid paraffin etc. The base fluid should have a high boiling point (above 200 °C) and a viscosity below 10 Pa·s. The density of the base fluid should be above 1200 kg·m⁻³ for better sedimentation stability. High density oils as fluoro-silicon or fenyl-silicon oils are used because of lower sedimentation rate of dispersed particles. In the case of ER fluids, an important parameter of the base fluid is the breakdown strength, that should be higher than 7 kV·m⁻³ [53].

For better colloidal stability, various additives are used to improve the base fluid properties, such as ER effect response, sedimentation, tribological or other properties. Materials [53] that can be adsorbed on particle surface are surfactants, acids, alkaline soils, water, etc. Water is not suitable for certain applications, because at higher temperatures evaporation occurs, that may lead to loss of ER effect [69].

Particles in the ER fluids are chosen according to its specific physical characteristics, like conductivity and dielectric properties. The size of particles ranges from 0.1 to 100 µm [70]. Materials used for particle production [53] are ceramics, organic materials polymers, etc.

5. TRIBOLOGICAL BEHAVIOUR OF ER FLUIDS

Tribological performance and behaviour of ER fluids is very difficult to generalize, because of different character and composition. The main difference in lubrication, friction and wear mechanisms is the size of polarizable particles contained in the ER fluid. In the case of larger particles, there is a higher risk, that abrasive and erosive wear might occur. The damage caused by erosion is even more significant when an external electric field is applied, therefore besides the mechanical and chemical effect on contact surfaces, there is also electrical and electrochemical effect. As for the smaller particles, mostly likely another type of wear – adhesive wear will occur [71].

5.1 Tribological behaviour of non-activated ER fluids

There were several tribological experiments with the purpose to compare the non-activated ER fluids, especially suspensions, with the base fluid. Pin-on-disc tribometer was used to determine the effect of particles on contact surfaces. Adhesive wear dominant the ER fluid with 30 wt.% particles of size 12 microns made from polymethacrylate salt [71]. Although a decrease of frictional force was observed with ER fluid, extensive delamination of contact surface occurred. Similar results showed ER fluid made of silicon oil and phosphorated starch particles. In comparison with base oil, phosphorated starch-based ER fluid has stabilization effect on wear. However, there is a higher rate of material loss due to abrasive wear caused by dispersed particles [72]. Even though noticeable changes in tribological performance of ER particles in base fluid were observed, the excitation of external electric field might change the behaviour of an ER fluid significantly. For understanding the behaviour of ER fluids, it is necessary to include the external field excitation to the investigation process.

5.2 Tribological behaviour of activated ER fluids

Electric field can significantly change ER fluid properties and the tribological performance. The main problem with ER fluids is its relatively high demand for exciting voltage. According to the type of ER fluid, the needed external electric field intensity varies in range 1 to 1000

$\text{MV}\cdot\text{m}^{-1}$. Because most of the experiments were performed on a very small amount of fluid and in tiny gap, the external voltage could be laboratory supply up to 30 V. In case of ionic liquids [73], the used maximum voltage was only 10 V providing $1.02 \text{ MV}\cdot\text{m}^{-1}$. Such relatively small voltage induced a change in friction coefficient up to almost double of the initial value without the electric field. This effect was even more significant with higher load. The increase of friction coefficient was explained as the result of formation of the ordered anions and cations layers near the electrified interfaces, which caused the growth of effective viscosity. Similar increasing of friction coefficient at low speeds was also observed for emulsions with oleic acid and lauric acid [67]. In contrast with mentioned results, liquid crystals showed decreasing tendency with increasing voltage at speeds lower than $1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. This behaviour was reportedly caused by orientation of molecules in direction of electric field [74].

As well as the MR fluids, it is possible to apply ER fluid to the finishing operations of surfaces. Thanks to abrasive particles of ER fluid, a high quality of surfaces finishing can be achieved [75,76]. ER fluids were applied for finishing of K9 mirror surface reaching roughness R_a up to 2.5 nm [75]. Although, the increasing voltage in range of 1500 to 3000 V did not result in higher surface quality, the relative change of surface roughness was faster at a higher supply voltage. Therefore, supply voltage does not affect the surface quality, but still can speed up the finishing process.

5.3 Electric field influence on thickness of lubricating layer

The rheological properties of a fluid determine its lubrication performance especially the film thickness. In case of ER fluids, there is a possibility to change the fluid behaviour by electric field stimuli, thereby the lubricating layer. Since some of the ER fluids are transparent liquids, optical methods (such as optical interferometry) can be implemented for the film thickness evaluation. Furthermore, there is much lower risk of interaction of particles with contact surfaces thanks to the composition of some ER fluids that are made of tiny polarizable particles, such as the natural ER fluid. There were experiments carried out to examine the damping characteristics using liquid crystal as a lubricant in bearing pad [62].

The viscosity of liquid crystal increased with the increasing external voltage, however, noticeable changes were only observed in presence of relative high excitation voltage of 1500 V.

Because of the high requirement on supply power in bearing pad experimental rig and the high cost of liquid crystals, ionic liquids were applied. There was a possibility to use ball-on-disc tribometer based on optical interferometry for the lubricating layer evaluation. Because of the consistency of ionic liquids and their transparent appearance it was possible to apply an optical method for experiments. Observed ionic liquid was 1-butyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate ([BMIm]PF₆) [77]. During experiments the noticeable changes in film thickness even at relatively low voltage of 5 V (150 MV·m⁻¹) were observed. The change was more significant at a higher voltage of 10 V (300 MV·m⁻¹), which induced the growth of lubricating layer approximately by 16 nm as it is shown in Fig. 5. The change in lubricating layer was the result of increasing fluid viscosity caused by the structured ionic layer generation. Similar results were obtained in the study of an emulsion of n-decanol and n-heptane with different volume ratios in a point contact, where higher external voltages up to 30 V were applied [78]. The most significant change was observed at a ratio of 1:4 n-decanol to n-heptane, where an increase in film thickness reached around 8 nm. The effect of the external electric field on lubricating layer of ER fluid emulsions was confirmed by Luo [63], who applied oleic and lauric acid in base oil as a lubricant.

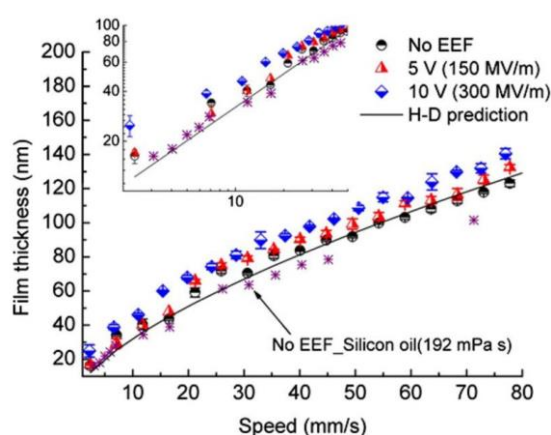


Fig. 5. Film thickness dependence on rolling speed in different electric field strength compared with Hamrock-Dowson prediction (reprinted with permission from AIP Publishing) [77].

Even though electric field has a noticeable effect on the lubricating layer of ER fluids, there are some negative consequences in real mechanisms subjected to electric field, e.g. when electric charge passes through bearings etc. For that reasons, experiments were performed at “ball-on-disc” tribometer [79]. The results showed, that cavitation occurs, when the fluid – glycerine is subjected to electric field excitation. A similar study [80] was carried out to explain the influence of electric field on micro bubbles creation in liquid paraffin enriched by zinc dialkyl dithiophosphate (ZDDP) additive. However, the intensity of micro bubble creation increased slightly and only a little change in film thickness was achieved when subjected to electric field of external voltage 90 V. The effect of ZDDP in liquid paraffin on lubricating layer under electric field activation was explained as the ability of ZDDP molecules to reorder. Not only the voltage, but also polarity causes different mechanisms of wear [81]. Positive polarity is responsible for microbubble emergence and cavitation, while negative polarity results in severe surface damage caused by electro-chemical effect.

In another study, that dealt with the effects of negative electric field in mechanisms was focused on the lubricant starvation in ball bearings [82]. Capillary action secures the replenishment of lubricating layer. When the bearing is subjected to electric potential, lubricant micropool destabilization occurs and lubricant is being drawn out of the contact area. This phenomenon was examined on “ball-on-disc” tribometer using n-hexadecanol and paraffin oil. The results confirmed the effect of electric field on lubricant migration from the contact area, what may lead to surface damage caused by lubricant starvation as schematically compared at Fig. 6 with fully flooded conditions.

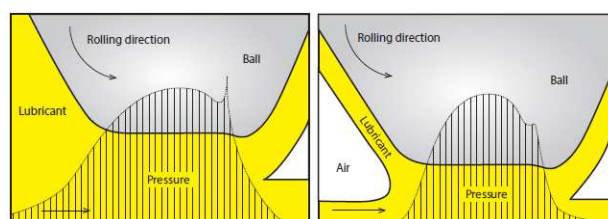


Fig. 6. Pressure profile (dotted line) and film thickness for fully flooded (left) and starved (right) EHL contact (reprinted with permission from ASME) [83].

Table 2. Summary of experiments – ER fluids

Author	Specimen details	Viscosity [mPa·s]	Activation [V]	Measured Characteristics	Experimental Rig	Load	Results
Xie et al. 2010 [80]	Liquid paraffin + 5 wt. % ZDDP	30.12	0 – 90	Lubricant film thickness (h_c)	Ball-on-disc tribometer	4 N (117 MPa)	Small increase of h_c
Xie et al. 2010 [77]	Ionic Liquids: [BMIm]PF ₆ [HMIm]PF ₆ [OMIm]PF ₆	210 410 690	0 – 10	h_c	Ball-on-disc tribometer	0.53 GPa	Increase of h_c
Xie et al. 2011 [78]	Compound <i>n</i> -heptane / <i>n</i> -decanol	0.37 – 10.7	0 – 30	h_c	Ball-on-disc tribometer	28 N	Increase of h_c
Matsumura et al. 2012 [62]	Liquid crystal	28	0 – 1500	h_c , Apparent viscosity (η_{app})	Sliding pad with electrodes	4 N	Increase of h_c , increase of η_{app}
Kong et al. 2016 [73]	Ionic Liquids: [C ₂ MIM][BF ₄] [C ₄ MIM][BF ₄] [C ₆ MIM][BF ₄]	41 98 300	0 – 10	COF	Reciprocating sliding tribometer	0,1 – 1 N (210 – 454 MPa)	Almost double COF after excitation

Mathematical models provide a different way of ER fluid analysis to simplify design and confirm functionality. There were several studies dealing with thin lubricating films under external electric field, where optimization algorithm of steady-state ER fluids based on an extended Bingham model and reconfigurable electric field gradients control using FEM were introduced [84,85]. Some findings show, that the presence of electricity in lubricating layer causes a rise in film thickness during EHD regime, as well as an increase in apparent viscosity [86]. Another study that dealt with dynamic behaviour of negative ER fluid journal bearing provided mathematical analysis based on Reynolds equation. The results shown, that the negative ER fluid can significantly reduce damping with increasing electric field intensity (up to 3 kV/mm), when lower damping is required during the excitation speed [87]. For obtaining valuable results, the mathematical model should be verified with corresponding fluid as it is shown in an experimental study [88], where experiment results carried on a journal bearing filled with ER fluid shown a good agreement with the presented analysis – when the voltage was applied, the journal bearing became stiffer.

The most important experimental studies of ER fluids are listed with parameters and achieved results in Table 2.

6. FUTURE SCOPE

Smart fluids could be a new basis of high-efficient fully controllable smart mechanisms. Although ER fluid was already successfully applied in MEMS, there are numerous potential applications of smart fluids for improving performance and efficiency. Possibly, development of smart lubricants will allow production of smart bearings, where an external stimulus steadily changes the rheological properties of lubricant. Therefore, bearing load capacity can be easily increased as needed. It can also reduce the drag losses of an oil bath, when the lubricating film thickness is reduced after passing the initial starting phase resulting in higher efficiency and longer service life. There is also a high potential of using smart fluids, especially ionic liquids, for 100 % oxygen environments lubrication, such as compressors and pneumatic systems, where standard lubricants could not be used.

7. CONCLUSIONS

This paper reviewed two main classes of smart fluids, ER and MR, applicable in tribomechanical systems and the following concluding remarks were derived:

1. The performance of an MR fluid can be significantly improved with shape of ferromagnetic particles. Spherical particles are characteristic with quick response, while polymerized chains provide a higher yield stress under activation of external magnetic field.
2. To reduce sedimentation rate of MR fluids, bimodal suspensions made of particles with different size can be applied. Larger microparticles secure the strength of MR effect, while smaller nanoparticles provide higher stability and lower sedimentation rate of MR fluid.
3. The surface quality of contact surfaces in the contact area affects the lubricant performance. Application of magnetic texture with MR fluid provides a better lubrication stability and lubricant replenishment. In addition, at a lower speed, the “anti-friction” effect occurs because of the influence of the texture geometry and magnetic field on the particles.
4. Liquids and lubricants with natural ER effect are more suitable for thin film lubrication since there are tiny polarizable particles present that cause much smaller wear of contact surfaces.
5. The external voltage needed to induce changes in lubricating film is dependent on the size of gap between polarizable surfaces. Relatively high electric field intensity is required for ER fluids excitation (approx. 300 MV·m⁻¹). In nanogap, a small external voltage (around 10 V) is enough to noticeably increase the film thickness, while a micron gap requires relatively high external voltage (up to 1500 V).
6. Since the price of smart fluids is relatively high, the mathematical models based on the experimental data of the fluid can be applied for CFD simulations. Therefore, development of new devices can be significantly improved.
7. The reviewed papers show, that magnetic fluids are more suitable for applications such as valves and dampers, etc., where a significant increase of effective viscosity is needed when the larger size of MR particles

is not limiting the functionality, while the ER fluids (especially natural ER fluids, such as IL) can be used in smart bearings and mechanisms working in thin film lubrication regime.

Acknowledgement

The research leading to these results has received funding from the MEYS under the National Sustainability Programme I (Project LO1202). Petr Svoboda would like to thank Yangchun Dong (University of Birmingham, UK) for the language correction of the text.

REFERENCES

- [1] A. Chiolerio, M.B. Quadrelli, *Smart Fluid Systems: The Advent of Autonomous Liquid Robotics*, Advanced Science, vol. 4, no. 7, 2017, doi: [10.1002/advs.201700036](https://doi.org/10.1002/advs.201700036)
- [2] S.B. Choi, N.M. Wereley, W. Li, M. Yu, J.H. Koo, *Applications of controllable smart fluids to mechanical systems*. Advances in Mechanical Engineering, vol. 2014, pp. 5–6, 2014, doi: [10.1155/2014/254864](https://doi.org/10.1155/2014/254864)
- [3] R. Stanway, *Smart fluids: current and future developments*, Materials Science and Technology, vol. 20, no. 8, pp. 931–939, 2004, doi: [10.1179/026708304225019867](https://doi.org/10.1179/026708304225019867)
- [4] N.J. Balmforth, I.A. Frigaard, G. Ovarlez, *Yielding to Stress: Recent Developments in Viscoplastic Fluid Mechanics*, Annual Review of Fluid Mechanics, vol. 46, pp. 121–146, 2014, doi: [10.1146/annurev-fluid-010313-141424](https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010313-141424)
- [5] G. Bossis, S. Lacis, A. Meunier, O. Volkova, *Magnetorheological fluids*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 252, no. 1–3 SPEC. ISS., pp. 224–228, 2002, doi: [10.1016/S0304-8853\(02\)00680-7](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(02)00680-7)
- [6] Z. Strecker, J. Roupec, I. Mazurek, M. Klapka, *Limiting factors of the response time of the magnetorheological damper*, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 47, no. 2, pp. 541–550, 2015, doi: [10.3233/JAE-140006](https://doi.org/10.3233/JAE-140006)
- [7] F.D. Goncalves, M. Ahmadian, J.D. Carlson, *Investigating the magnetorheological effect at high flow velocities*, Smart Materials and Structures, vol. 15, no. 1, pp. 75–85, 2006, doi: [10.1088/0964-1726/15/1/036](https://doi.org/10.1088/0964-1726/15/1/036)

- [8] B.J. Park, F.F. Fang, H.J. Choi, *Magnetorheology: materials and application*, Soft Matter, vol. 6, no. 21, pp. 5246-5353, 2010, doi: [10.1039/C0SM00014K](https://doi.org/10.1039/C0SM00014K)
- [9] W. Song, M.S. Seong, S.B. Choi, Ch. H. Lee, M. Cho, *Tribological characteristics of magneto-rheological fluid for movement sensor application*, Smart Materials and Structures, vol. 23, no. 1, 2014, doi: [10.1088/0964-1726/23/1/017001](https://doi.org/10.1088/0964-1726/23/1/017001)
- [10] K. Karakoc, E.J. Park, A. Suleman, *Design considerations for an automotive magnetorheological brake*, Mechatronics, vol. 18, no. 8, pp. 434-447, 2008, doi: [10.1016/j.mechatronics.2008.02.003](https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2008.02.003)
- [11] A. Grunwald, A.G. Olabi, *Design of magneto-rheological (MR) valve*, Sensors and Actuators, A: Physical, vol. 148, no. 1, pp. 211-223, 2008, doi: [10.1016/j.sna.2008.07.028](https://doi.org/10.1016/j.sna.2008.07.028)
- [12] Ş. Çeşmeci, T. Engin, *Modeling and testing of a field-controllable magnetorheological fluid damper*, International Journal of Mechanical Sciences, vol. 52, no. 8, pp. 1036-1046, 2010, doi: [10.1016/j.ijmecsci.2010.04.007](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2010.04.007)
- [13] J.D. Carlson, M.R. Jolly, *MR fluid, foam and elastomer devices*, Mechatronics, vol. 10, no. 4, pp. 555-569, 2000, doi: [10.1016/S0957-4158\(99\)00064-1](https://doi.org/10.1016/S0957-4158(99)00064-1)
- [14] M. Ashtiani, S.H. Hashemabadi, A. Ghaffari, *A review on the magnetorheological fluid preparation and stabilization*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 374, pp. 711-715, 2015, doi: [10.1016/j.jmmm.2014.09.020](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.09.020)
- [15] J. Gołdasz, B. Sapiński, *Insight into magnetorheological shock absorbers*, pp. 1-224, 2015, doi: [10.1007/978-3-319-13233-4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-13233-4)
- [16] J.P. Rich, P.S. Doyle, G.H. McKinley, *Magnetorheology in an aging, yield stress matrix fluid*, Rheologica Acta, vol. 51, no. 7, pp. 579-593, 2012, doi: [10.1007/s00397-012-0632-z](https://doi.org/10.1007/s00397-012-0632-z)
- [17] S. Genc, P.P. Phule, *Rheological properties of magnetorheological fluids*, Smart Materials & Structures, vol. 11, no. 1, pp. 140-146, 2002, doi: [10.1088/0964-1726/11/1/316](https://doi.org/10.1088/0964-1726/11/1/316)
- [18] K. Raj, B. Moskowitz, R. Casciari, *Advances in ferrofluid technology*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 149, no. 1-2, pp. 174-180, 1995, doi: [10.1016/0304-8853\(95\)00365-7](https://doi.org/10.1016/0304-8853(95)00365-7)
- [19] K. Raj, R.J. Boulton, *Ferrofluids - Properties and applications*, Materials and Design, vol. 8, no. 4, pp. 233-236, 1987, doi: [10.1016/0261-3069\(87\)90139-7](https://doi.org/10.1016/0261-3069(87)90139-7)
- [20] E. Svåsand, K. De L. Kristiansen, Ø. G. Martinsen, G. Helgesen, S. Grimnes, A. T. Skjeltorp, *Behavior of carbon cone particle dispersions in electric and magnetic fields*, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, vol. 339, no. 1-3, pp. 211-216, 2009, doi: [10.1016/j.colsurfa.2009.02.025](https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2009.02.025)
- [21] N. Jahan, S. Pathak, K. Jain, R.P. Pant, *Enhancement in viscoelastic properties of flake-shaped iron based magnetorheological fluid using ferrofluid*, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, vol. 529, no. March, pp. 88-94, 2017, doi: [10.1016/j.colsurfa.2017.05.057](https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.05.057)
- [22] P. Kuzhir, M.T. López-López, G. Vertelov, Ch. Pradille, G. Bossis, *Shear and squeeze rheometry of suspensions of magnetic polymerized chains*, Rheologica Acta, vol. 47, no. 2, pp. 179-187, 2008, doi: [10.1007/s00397-007-0230-7](https://doi.org/10.1007/s00397-007-0230-7)
- [23] J.L. Viota, F. González-Caballero, J.D.G. Durán, A. V. Delgado, *Study of the colloidal stability of concentrated bimodal magnetic fluids*, Journal of Colloid and Interface Science, vol. 309, no. 1, pp. 135-139, 2007, doi: [10.1016/j.jcis.2007.01.066](https://doi.org/10.1016/j.jcis.2007.01.066)
- [24] J. De Vicente, D.J. Klingenberg, R. Hidalgo-Alvarez, *Magnetorheological fluids: a review*, Soft Matter, vol. 7, no. 8, pp. 3701-3710, 2011, doi: [10.1039/C0SM01221A](https://doi.org/10.1039/C0SM01221A)
- [25] I.A. Brigadnov, A. Dorfmann, *Mathematical modelling of magnetorheological fluids*, Continuum Mech. Thermodyn., vol. 17, no. 1, pp. 29-42, 2005, doi: [10.1007/s00161-004-0185-1](https://doi.org/10.1007/s00161-004-0185-1)
- [26] D. Susan-Resiga, *A rheological model for magneto-rheological fluids*, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 20, no. 8, pp. 1001-1010, 2009, doi: [10.1177/1045389X08100979](https://doi.org/10.1177/1045389X08100979)
- [27] D.A. Bompos, P.G. Nikolakopoulos, *Simulation Modelling Practice and Theory CFD simulation of magnetorheological fluid journal bearings*, Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 19, no. 4, pp. 1035-1060, 2011, doi: [10.1016/j.simpat.2011.01.001](https://doi.org/10.1016/j.simpat.2011.01.001)
- [28] M.I. Varela-Jiménez, J.L. Vargas Luna, J.A. Cortés-Ramírez, G. Song, *Constitutive model for shear yield stress of magnetorheological fluid based on the concept of state transition*, Smart Materials and Structures, vol. 24, no. 4, 2015, doi: [10.1088/0964-1726/24/4/045039](https://doi.org/10.1088/0964-1726/24/4/045039)
- [29] P.L. Wong, W.A. Bullough, C. Feng, S. Lingard, *Tribological performance of a magneto-rheological suspension*, Wear, vol. 247, no. 1, pp. 33-40, 2001, doi: [10.1016/S0043-1648\(00\)00507-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00507-X)

- [30] K. Shahrivar, A.L. Ortiz, J. De Vicente, *A comparative study of the tribological performance of ferrofluids and magnetorheological fluids within steel-steel point contacts*, Tribology International, vol. 78, pp. 125–133, 2014, doi: [10.1016/j.triboint.2014.05.008](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.05.008)
- [31] J.W. Sohn, S.B. Choi, Ch.H. Lee, M.W. Cho, *Wear Characteristics of Magnetorheological Fluid under Boundary Lubrication*, Advanced Materials Research, vol. 79–82, pp. 83–86, 2009, doi: [10.4028/www.scientific.net/AMR.79-82.83](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.79-82.83)
- [32] A. Bombard, F.R. Goncalves, K. Shahrivar, A.L. Ortiz, J. De Vicente, *Tribological behavior of ionic liquid-based magnetorheological fluids in steel and polymeric point contacts*, Tribology International, vol. 81, pp. 309–320, 2014, doi: [10.1016/j.triboint.2014.09.013](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.09.013)
- [33] E. Uhlmann, G. Spur, N. Bayat, R. Patzwald, *Application of magnetic fluids in tribotechnical systems*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 252, no. 1–3 SPEC. ISS., pp. 336–340, 2002, doi: [10.1016/S0304-8853\(02\)00724-2](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(02)00724-2)
- [34] D.J. Klingenberg, *Magnetorheology: Applications and challenges*, AIChE Journal, vol. 47, no. 2, pp. 246–249, 2001, doi: [10.1002/aic.690470202](https://doi.org/10.1002/aic.690470202)
- [35] J. Seok, S.O. Lee, K.I. Jang, B.K. Min, S.J. Lee, *Tribological properties of a magnetorheological (MR) fluid in a finishing process*, Tribology Transactions, vol. 52, no. 4, pp. 460–469, 2009, doi: [10.1080/10402000802687932](https://doi.org/10.1080/10402000802687932)
- [36] P. Zhang, K.H. Lee, Ch.H. Lee, *Reciprocating friction characteristics of magneto-rheological fluid for aluminum under magnetic field*, Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition), vol. 24, no. 1, pp. 171–176, 2014, doi: [10.1016/S1003-6326\(14\)63044-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63044-2)
- [37] H.W. Sun, S.C. Yang, *Revolved Surface Finishing with Smart Fluid Abrasives*, Key Engineering Materials, vol. 304–305, pp. 579–583, 2006, doi: [10.4028/www.scientific.net/KEM.304-30.579](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.304-30.579)
- [38] W.L. Song, Ch.H. Lee, S. B. Choi, *Sliding wear behavior of magnetorheological fluid for brass with and without magnetic field*, Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition), vol. 23, no. 2, pp. 400–405, 2013, doi: [10.1016/S1003-6326\(13\)62476-0](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62476-0)
- [39] W. Li-Jun, G. Chu-Wen, Y. Ryuichiro, W. Yue, *Tribological properties of Mn-Zn-Fe magnetic fluids under magnetic field*, Tribology International, vol. 42, no. 6, pp. 792–797, 2009, doi: [10.1016/j.triboint.2008.10.009](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.10.009)
- [40] W.L. Song, S.B. Choi, J.Y. Choi, Ch. H. Lee, *Wear and Friction Characteristics of Magnetorheological Fluid under Magnetic Field Activation*, Tribology Transactions, vol. 54, no. 4, pp. 616–624, 2011, doi: [10.1080/10402004.2011.584365](https://doi.org/10.1080/10402004.2011.584365)
- [41] P. Zhang, K.H. Lee, C.H. Lee, *Friction behavior of magnetorheological fluids with different material types and magnetic field strength*, Chinese Journal of Mechanical Engineering, vol. 29, no. 1, pp. 84–90, 2016, doi: [10.3901/CJME.2015.1126.139](https://doi.org/10.3901/CJME.2015.1126.139)
- [42] Z.D. Hu, H. Yan, H.Z. Qiu, P. Zhang, Q. Liu, *Friction and wear of magnetorheological fluid under magnetic field*, Wear, vol. 278–279, pp. 48–52, 2012, doi: [10.1016/j.wear.2012.01.006](https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.01.006)
- [43] P. Zhang, K.H. Lee, C.H. Lee, *Fretting friction and wear characteristics of magnetorheological fluid under different magnetic field strengths*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 421, pp. 13–18, 2017, doi: [10.1016/j.jmmm.2016.07.064](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.07.064)
- [44] K. Shahrivar, J. De Vicente, *Ferrofluid lubrication of compliant polymeric contacts: Effect of non-homogeneous magnetic fields*, Tribology Letters, vol. 56, no. 2, pp. 281–292, 2014, doi: [10.1007/s11249-014-0408-y](https://doi.org/10.1007/s11249-014-0408-y)
- [45] C. Shen, W. Huang, G. Ma, X. Wang, *A novel surface texture for magnetic fluid lubrication*, Surface and Coatings Technology, vol. 204, no. 4, pp. 433–439, 2009, doi: [10.1016/j.surfcoat.2009.08.003](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.08.003)
- [46] N. Vaz, K. G. Binu, P. Serrao, M.P. Hemanth, J. Jacob, N. Roy, E. Dias, *Experimental Investigation of Frictional Force in a Hydrodynamic Journal Bearing Lubricated with Magnetorheological Fluid*, Journal of Mechanical Engineering and Automation, vol. 7, no. 5, pp. 131–134, 2017, doi: [10.5923/j.jmea.20170705.01](https://doi.org/10.5923/j.jmea.20170705.01)
- [47] W. Huang, X. Wang, *Ferrofluids lubrication: a status report*, Lubrication Science, vol. 28, no. 1, pp. 3–26, 2016, doi: [10.1002/ls.1291](https://doi.org/10.1002/ls.1291)
- [48] H. Ke, W. Huang, X. Wang, *Controlling lubricant migration using ferrofluids*, Tribology International, vol. 93, pp. 318–323, 2016, doi: [10.1016/j.triboint.2015.09.038](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.09.038)
- [49] R.S. Anand, P. Kumar, *Effect of Starvation on Elastohydrodynamically Lubricated Contacts using Magnetorheological Fluids*, in RAM-2015 Conference, 15–17 May, 2015, SVNIT SuratAt: Surat, Gujarat, India, pp. 1–6.
- [50] E.A. Reyes, J. De Vincente, R. Hidalgo-Álvarez, C. Myant, T. Reddyhoff, H.A. Spikes, *Soft elastohydrodynamic lubrication*, Tribology Letters, vol. 39, no. 1, pp. 109–114, 2010, doi: [10.1007/s11249-010-9623-3](https://doi.org/10.1007/s11249-010-9623-3)
- [51] T.C. Halsey, J.E. Martin, D. Adolf, *Rheology of electrorheological fluids*, Physical Review Letters, vol. 68, no. 10, pp. 1519–1522, 1992, doi: [10.1103/PhysRevLett.68.1519](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.68.1519)

- [52] J.C. Hill, T.H. Van Steenkiste, *Response times of electrorheological fluids*, Journal of Applied Physics, vol. 70, pp. 1207-1211, 1991, doi: [10.1063/1.349574](https://doi.org/10.1063/1.349574)
- [53] T. Hao, *Electrorheological fluids*, Advanced Materials, 2001, vol. 13, no. 24, pp. 1847-1857, 2001, doi: [10.1002/1521-4095\(200112\)13:24<1847::AID-ADMA1847>3.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/1521-4095(200112)13:24<1847::AID-ADMA1847>3.0.CO;2-A)
- [54] C. Boissy, P. Atten, J.N. Foulc, *On a negative electrorheological effect*, Journal of Electrostatics, vol. 35, no. 1, pp. 13-20, 1995, doi: [10.1016/0304-3886\(95\)00015-3](https://doi.org/10.1016/0304-3886(95)00015-3)
- [55] Y.G. Ko, U.S. Choi, *Negative electrorheological fluids*. Journal of Rheology, vol. 57, no. 6 (1655), 2013, doi: [10.1122/1.4821857](https://doi.org/10.1122/1.4821857)
- [56] K. Yoshida, N. Tsukamoto, J.W. Kim, S. Yokota, *A study on a soft microgripper using MEMS-based divided electrode type flexible electro-rheological valves*, Mechatronics, vol. 29, pp. 103-109, 2015, doi: [10.1016/j.mechatronics.2014.07.007](https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2014.07.007)
- [57] P. Abgrall, N.T. Nguyen, *Nanofluidic devices and their applications*. Analytical Chemistry, vol. 80, no. 7, pp. 2326-2341, 2008, doi: [10.1021/ac702296u](https://doi.org/10.1021/ac702296u)
- [58] U.S. Choi, Y.S. Park, S.S. Lee, *Electrorheological behavior of chitosan succinate suspension as an anhydrous ER fluid*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, vol. 211, no. 1, pp. 85-90, 2002, doi: [10.1016/S0927-7757\(02\)00234-0](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(02)00234-0)
- [59] J. Dupont, R.F. De Souza, P.A.Z. Suarez, *Ionic liquid (molten salt) phase organometallic catalysis*, Chemical Reviews, vol. 102, no. 10, pp. 3667-3692, 2002, doi: [10.1021/cr010338r](https://doi.org/10.1021/cr010338r)
- [60] M.D. Bermúdez, A.E. Jiménez, J. Sanes, F.J. Carrión, *Ionic liquids as advanced lubricant fluids*, Molecules, vol. 14, no. 8, pp. 2888-2908, 2009, doi: [10.3390/molecules14082888](https://doi.org/10.3390/molecules14082888)
- [61] Z. Lei, B. Chen, Y.M. Koo, D.R. Macfarlane, *Introduction: Ionic Liquids*. Chemical Reviews, vol. 117, no. 10, pp. 6633-6635, 2017, doi: [10.1021/acs.chemrev.7b00246](https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00246)
- [62] Y. Matsumura, T. Shiraishi, S. Morishita, *Stiffness and damping of liquid crystal lubricating film under electric field*, Tribology International, vol. 54, pp. 32-37, 2012, doi: [10.1016/j.triboint.2012.05.009](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2012.05.009)
- [63] M. Gao, L. Ma, J. Luo, *Effect of Alkyl Chain Length on the Orientational Behavior of Liquid Crystals Nano-Film*, Tribology Letters, vol. 62, no. 2, pp. 1-7, 2016, doi: [10.1007/s11249-016-0663-1](https://doi.org/10.1007/s11249-016-0663-1)
- [64] C.J. Reeves, A. Siddaiah, P.L. Menezes, *Tribological study of imidazolium and phosphonium ionic liquid-based lubricants as additives in carboxylic acid-based natural oil: Advancements in environmentally friendly lubricants*, Journal of Cleaner Production, vol. 176, pp. 241-250, 2018, doi: [10.1016/j.jclepro.2017.12.099](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.099)
- [65] I. Minami, *Ionic liquids in tribology*, Molecules (Basel, Switzerland), vol. 14, no. 6, pp. 2286-2305, 2009, doi: [10.3390/molecules14062286](https://doi.org/10.3390/molecules14062286)
- [66] Y. Zhou, J. Qu, *Ionic liquids as lubricant additives: A review*, ACS Applied Materials and Interfaces, vol. 9, no. 4, pp. 3209-3222, 2017, doi: [10.1021/acsami.6b12489](https://doi.org/10.1021/acsami.6b12489)
- [67] J.B. Luo, M.W. Shen, S.Z. Wen, *Tribological properties of nanoliquid film under an external electric field*, Journal of Applied Physics, vol. 96, no. 11, pp. 6733-6738, 2004, doi: [10.1063/1.1806259](https://doi.org/10.1063/1.1806259)
- [68] G. Xie, J. Luo, S. Liu, D. Guo, Ch. Zhang, *Thin liquid film lubrication under external electrical fields: Roles of liquid intermolecular interactions*, Journal of Applied Physics, vol. 109, no. 11, 2011, doi: [10.1063/1.3587477](https://doi.org/10.1063/1.3587477)
- [69] T.C. Halsey, *Electrorheological Fluids*, Science (New York, N.Y.), 1992, vol. 258, no. 5083, pp. 761-766, 1992, doi: [10.1126/science.258.5083.761](https://doi.org/10.1126/science.258.5083.761)
- [70] P. Dong, Ch. Wang, S. Zhao, *Preparation of high performance electrorheological fluids with coke-like particles from FCC slurry conversion*. Fuel, vol. 84, no. 6 SPEC. ISS., pp. 685-689, 2005, doi: [10.1016/j.fuel.2004.03.021](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.03.021)
- [71] S. Lingard, W.A. Bullough, W.M. Shek, *Tribological performance of an electro-rheological fluid*, Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 22, pp. 1639-1645, 1989, doi: [10.1088/0022-3727/22/11/012](https://doi.org/10.1088/0022-3727/22/11/012)
- [72] S.B. Choi, J.W. Sohn, Y.M. Han, Ch.H. Lee, *Wear Characteristics Under Boundary Lubrication Contacts in Phosphorated Starch-Based Electrorheological Fluid*, Tribology Transactions, vol. 53, no. 2, pp. 256-265, 2010, doi: [10.1080/1040200903312331](https://doi.org/10.1080/1040200903312331)
- [73] L. Kong, W. Huang, X. Wang, *Ionic liquid lubrication at electrified interfaces*, Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 49, no. 22, 2016, doi: [10.1088/0022-3727/49/22/225301](https://doi.org/10.1088/0022-3727/49/22/225301)
- [74] Y. Gao, B. Xue, L. Ma, J. Luo, *Effect of liquid crystal molecular orientation controlled by an electric field on friction*, Tribology International, vol. 115, no. June, pp. 477-482, 2017, doi: [10.1016/j.triboint.2017.06.021](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.06.021)
- [75] H. Cheng, J. Su, Y. Chen, H.Y. Tam, *Profile and roughness of electrorheological finishing optical*

- surfaces, *Frontiers of Optoelectronics*, vol. 8, no. 3, pp. 306–313, 2015, doi: [10.1007/s12200-014-0401-y](https://doi.org/10.1007/s12200-014-0401-y)
- [76] J. Su, H. Cheng, Y. Wen, Y. Feng, H.Y. Tam, *Investigation into the mechanism for ultra smooth electrorheological finishing using wheel-like finishing tool*, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 238, pp. 124–131, 2016, doi: [10.1016/j.jmatprotec.2016.07.019](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.07.019)
- [77] G. Xie, J. Luo, D. Guo, S. Liu, *Nanoconfined ionic liquids under electric fields*, *Applied Physics Letters*, vol. 96, no. 4, pp. 1–3, 2010, doi: [10.1063/1.3292213](https://doi.org/10.1063/1.3292213)
- [78] G. Xie, J. Luo, S. Liu, D. Guo, Ch. Zhang, *Nanoconfined liquid aliphatic compounds under external electric fields: roles of headgroup and alkyl chain length*, *Soft Matter*, vol. 7, no. 9, pp. 4453–4460, 2011, doi: [10.1039/C0SM00971G](https://doi.org/10.1039/C0SM00971G)
- [79] Y. He, J. Luo, G. Xie, *Characteristics of thin liquid film under an external electric field*, *Tribology International*, vol. 40, no. 10–12 SPEC. ISS., pp. 1718–1723, 2007, doi: [10.1016/j.triboint.2007.02.007](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2007.02.007)
- [80] G. Xie, G. Li, J.B. Luo, S.H. Liu, *Effects of electric field on characteristics of nano-confined lubricant films with ZDDP additive*, *Tribology International*, vol. 43, no. 5–6, pp. 975–980, 2010, doi: [10.1016/j.triboint.2009.12.067](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.12.067)
- [81] G. Xie, L. Si, D. Guo, S. Liu, J. Luo, *Interface characteristics of thin liquid films in a charged lubricated contact*, *Surface and Interface Analysis*, vol. 47, no. 3, pp. 315–324, 2015, doi: [10.1002/sia.5710](https://doi.org/10.1002/sia.5710)
- [82] G. Xie, Z. Cui, L. Si, D. Guo, *Destabilization of lubrication oil micropool under charged conditions*, *Industrial Lubrication and Tribology*, vol. 69, no. 1, pp. 59–64, 2017, doi: [10.1108/ILT-11-2015-0184](https://doi.org/10.1108/ILT-11-2015-0184)
- [83] D. Kostal, P. Sperka, P. Svoboda, I. Krupka, M. Hartl, *Influence of Lubricant Inlet Film Thickness on Elastohydrodynamically Lubricated Contact Starvation*, *Journal of Tribology*, vol. 139 no. 5, pp. 1–6, 2017, doi: [10.1115/1.4035777](https://doi.org/10.1115/1.4035777)
- [84] J.C. De Los Reyes, I. Yousept, *Optimal control of electrorheological fluids through the action of electric fields*, *Computational Optimization and Applications*, vol. 62, no. 1, pp. 241–270, 2015, doi: [10.1007/s10589-014-9705-5](https://doi.org/10.1007/s10589-014-9705-5)
- [85] S. Boedo, *Formation of dynamic reconfigurable electric field gradients in thin lubricant films through transient elastohydrodynamic squeeze film action*, *Tribology International*, vol. 116, no. June, pp. 329–337, 2017, doi: [10.1016/j.triboint.2017.07.013](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.07.013)
- [86] Q. Zuo, P. Huang, F. Su, *Theory analysis of asymmetrical electric double layer effects on thin film lubrication*, *Tribology International*, vol. 49, pp. 67–74, 2012, doi: [10.1016/j.triboint.2011.12.021](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2011.12.021)
- [87] A. Bouzidane, M. Thomas, *An electrorheological hydrostatic journal bearing for controlling rotor vibration*, *Computers and Structures*, vol. 86, pp. 463–472, 2008, doi: [10.1016/j.compstruc.2007.02.006](https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2007.02.006)
- [88] P.G. Nikolakopoulos, C.A. Papadopoulos, *Controllable high speed journal bearings, lubricated with electro- rheological fluids, An analytical and experimental approach*, *Tribology International*, vol. 31, no. 5, pp. 225–234, 1998, doi: [10.1016/S0301-679X\(98\)00025-5](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(98)00025-5)